

环剪试验条件下不同地区黄土的残余强度研究*

丁红丽, 骆亚生

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:利用 HJ-1 型环剪仪,以泾阳、子洲、兰州 3 个地区的黄土为研究对象,分析了剪切速率、含水率、竖向应力及干密度 4 个影响因素对黄土残余强度的影响。结果表明:竖向应力对黄土的残余强度具有最明显的影响,其次是含水率、剪切速率、干密度;分析比较 3 个地区黄土的残余强度,得出对于粉粒含量较多的兰州黄土,其含水率为 19% 时对应的残余强度较大;对于粗粒含量较多的子洲黄土,含水率小于最优含水率,同时干密度为 1.63 g/cm³ 时对应的残余强度较大;对于黏粒含量较多的泾阳黄土,含水率较小,同时干密度较小时对应的残余强度较大。探讨不同地区黄土残余强度的变化规律,对于边坡的稳定性分析及滑坡带的防治具有重要的学术及工程意义。

关键词: 不同地区;黄土;环剪试验;残余强度

中图分类号:O346.4 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)06-1511-06

Research on Residual Strength of Loess in Different Regions
under Ring Shear Tests

Ding Hongli, Luo Yasheng

(Research on College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, P.R. China)

Abstract: By HJ-1 type ring shear apparatus, taking the loess in Jingyang, Zizhou and Lanzhou as research objects, the impacts of four factors including shear rate, moisture content, vertical stress and dry density on the loess residual strength are analyzed. The results indicate that the most obvious factor on the loess residual strength is vertical stress, followed by moisture content, shear rate and dry density; Comparing the loess residual strength of three areas, it is shown that for Lanzhou loess with a large amount of silt content, the residual strength is larger when the moisture content is 19%, for Zizhou loess with lots of coarse, the residual strength is greater when the moisture content is less than the optimum moisture content while the dry density is 1.63 g/cm³, for Jingyang loess with a number of clay content, the residual strength is more considerable when the moisture content and dry density are little. The study on variation of loess residual strength in different regions has important academic and engineering significance for the stability analysis of the slope and the comprehensive prevention and control of the landslide.

Keywords: different regions; loess; ring shear test; residual strength

0 引言

黄土本身性质特殊,且黄土地区滑坡灾害频繁

发生、危害大、波及范围广,已成为我国地质灾害中最严重的一种^[1]。残余抗剪强度是指岩土体的抗剪强度随变形量增大达峰值后,逐渐稳定为一个最

* 收稿日期:2017-04-15(修改稿)
作者简介:丁红丽(1990-),女,河南郑州人,硕士生,主要从事岩土工程理论与计算方面的研究。
E-mail:dinghl852711@163.com
基金项目:国家自然科学基金(50578134)

低值。自这个概念被提出以后,以残余强度为理论基础的滑坡稳定性计算及加固方面的研究逐渐展开^[2-5]。残余强度的获取方法有很多,环剪仪由于其剪切面恒定及可以实现连续剪切等优点而被广泛使用。越来越多的研究表明,环剪试验是目前测定土体残余抗剪强度最先进和最有效的方法,对于掌握土体残余强度特性具有不可替代的作用^[6]。

目前对于残余强度的研究多侧重于试验方法、某一地区或某一特性土的试验分析,如王顺等^[7]发现预剪和多级剪试验得到的残余强度偏大,应该首选单级剪切试验测试滑带土残余强度指标;刘动等^[8]指出环剪试验可以较理想地获取滑带土试样在大剪切位移下的残余强度;廖建民等^[9]发现有效应力越大,滑带土颗粒越容易沿剪切方向完成定向排列。而以不同地区的黄土为研究对象进行环剪试验,从而对不同地区的黄土的残余强度进行对比分析的研究还很少见,而此类研究对不同地区老滑坡的潜在灾害防治具有一定指导意义。基于此,本文对泾阳、子洲、兰州 3 个地区的黄土进行环剪试验,分析不同因素对残余强度的影响,为黄土地

区的工程建设提供参考。

1 试验土样和试验方案

1.1 试验土样

试验所用土料分别取自陕西泾阳、甘肃兰州和陕西子洲,取土深度分别为 3 m、4 m、5 m,均属于晚更新世 Q₃黄土。泾阳、兰州和子洲 3 个地区黄土的天然含水率分别为 16.2%、5.2%、7.0%,比重分别为 2.74、2.71、2.71,天然干密度分别为 1.28、1.40、1.45 g/cm³。3 个地区土料的物理指标、化学及矿物成分指标分别见表 1、表 2。

表 1 不同地区土料物理性质指标

Table 1 Physical indexes of loess samples in different regions

土样	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	按塑性图 分类	颗粒组成/%		
					>0.075 mm	0.005~ 0.075 mm	<0.005 mm
JY	32.7	16.4	16.3	CL	0.9	69.9	29.2
LZ	28.8	18.0	10.8	CL	0.0	84.0	16.0
ZZ	26.9	17.4	9.5	CLY	21.5	70.4	8.1

表 2 不同地区黄土化学成分及矿物成分

Table 2 Chemical composition and mineral composition of loess samples in different regions

土样	易溶盐	有机质	非粘土矿物含量/%					黏土 矿物 总量 /%	粘土矿物含量/%				全土中	全土中
	总量/ (g·kg ⁻¹)	含量/ (g·kg ⁻¹)	石英	钾长石	钠长石	方解石	其他		伊-蒙混 层(I/S)	伊利 石(I)	高岭 石(K)	绿泥 石(C)	伊利石 估算值 /%	蒙脱石 估算值 /%
JY	5.0	2.5	34.1	1.3	9.7	16.2	1.2	24.6	13.5	15.4	3.4	5.3	19.6	9.3
LZ	0.8	1.6	29.3	3.3	16.4	24.3	2.1	37.5	7.4	10.6	2.7	3.9	12.7	5.3
ZZ	0.9	1.3	45.1	1.7	14.4	12.6	1.5	24.7	12.1	6.2	2.5	4.0	10.7	7.6

1.2 试验方案

本试验采用重塑黄土试样,试验仪器采用江苏溧阳永昌工程实验仪器厂生产的 HJ-1 型环剪仪。试验土样为 $\phi 100$ mm(外径)× $\phi 60$ mm(内径)×20 mm(高)的空心圆环。剪切方式为单级剪,针对不同地区、不同含水率、不同干密度的试样在不同的竖向应力及剪切速率条件下进行剪切试验,具体方案如表 3。试验中采用了不同的剪切速率,根据剪应力-位移曲线,当剪应力达到一稳定值时,环剪试验结束。

表 3 环剪试验方案

Table 2 Ring shear tests plan

土样	含水率 <i>w</i> /%	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	竖向应力 σ /kPa	剪切速率 <i>v</i> /(mm·min ⁻¹)
兰州、子洲 泾阳	13、16、19	1.43、1.53、 1.63	200	0.1、1.0、5.0
	16	1.53	100、200、 300	1.0

1.3 计算原理

环剪试验采用空心圆环试样。HJ-1 型环剪仪从中间开缝,土样在上下两个剪切盒中由 12 片刀刃固定,竖向应力通过扭轮承压板作用于试样上。试验时上盘不动,下盘匀速转动,以此完成剪切过程。环剪试验的剪切面恒定不变,故假定试验过程中的剪应力和正应力分布是均匀的,试验不能直接获取剪应力和剪切位移值,得到的是一系列扭矩 M 和角位移 θ ,根据假定采用如下公式进行转化:

(1)剪应力 τ :

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

式中: M 为扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; r_1 、 r_2 分别为试样内径、外径, cm 。

(2)剪切位移 S :

$$S = v \cdot t$$

式中: v 为剪切速率。

2 试验结果分析

2.1 剪切速率对不同地区黄土残余强度的影响

剪切速率对残余强度的影响是比较复杂的^[10],笔者根据现有仪器条件,选取 0.1 mm/min, 1.0 mm/min, 5.0 mm/min 3 个剪切速率来探究剪切速率对不同地区黄土残余强度的影响。就泾阳黄土,以 $\rho_d = 1.53 \text{ g/cm}^3$, $w = 16\%$, $\sigma = 200 \text{ kPa}$ 为例,建立剪应力-位移关系曲线,试验结果如图 1。

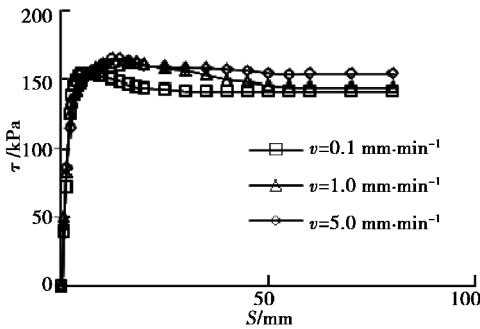


图 1 泾阳黄土在不同剪切速率下的剪应力-位移关系曲线

Fig. 1 Shear stress and displacement relation curves of Jingyang loess under different shear rates

从图 1 中可以看出,在不同剪切速率下,泾阳黄土都表现出应变软化现象,且剪切速率越大,应变软化现象越不明显;剪切速率对黄土残余强度的影响不明显,但最后达到的残余强度略微不同,总

体表现为剪切速率较大时,残余强度偏大。这是因为在排水剪切过程中,当剪切速率越大时,剪切面迅速形成,孔隙水压力来不及消散,导致土的残余强度偏大。

2.2 含水率对不同地区黄土残余强度的影响

根据 3 个地区黄土的液塑限及试样特点,试验控制 3 个含水率分别 $w = 13\%$, $w = 16\%$, $w = 19\%$, 来分析含水率对不同地区黄土残余强度的影响。就子洲黄土,以 $\rho_d = 1.53 \text{ g/cm}^3$, $v = 1.0 \text{ mm/min}$, $\sigma = 200 \text{ kPa}$ 为例,建立剪应力-位移关系曲线,试验结果如图 2。

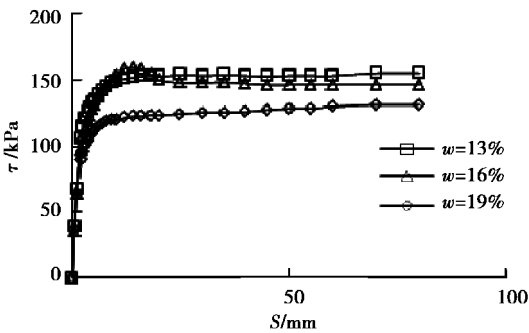


图 2 子洲黄土在不同含水率情况下的剪应力-位移关系曲线

Fig. 2 Shear stress and displacement relation curves of Zizhou loess under different moisture contents

不同含水率情况下,黄土的应变硬化及软化现象没有明显的规律性,但含水率对黄土残余强度有明显的影响,表现为含水率越小,残余强度越大。含水率增大致使残余强度降低,一方面是由于剪切过程中,剪切面附近的土颗粒逐渐定向排列,孔隙水向剪切面聚集造成土样中水分分布不均,并会对剪切面附近的土颗粒起到润滑作用,降低土粒之间的咬合摩擦力;另一方面当含水率较大时,土骨架间的孔隙被水填满,根据有效应力原理,水分本身不承担剪应力,故含水率较高的时候,残余强度反而小。

2.3 竖向应力对不同地区黄土残余强度的影响

为探究竖向应力对残余强度的影响,取 $\sigma = 100 \text{ kPa}$, $\sigma = 200 \text{ kPa}$, $\sigma = 300 \text{ kPa}$ 3 个控制应力,就泾阳黄土,以 $\rho_d = 1.53 \text{ g/cm}^3$, $v = 1.0 \text{ mm/min}$, $w = 16\%$ 为例,建立剪应力-位移关系曲线,试验结果如图 3。

从图 3 可以看出,竖向应力越小,应变软化现象越不明显;竖向应力对残余强度的影响比较明

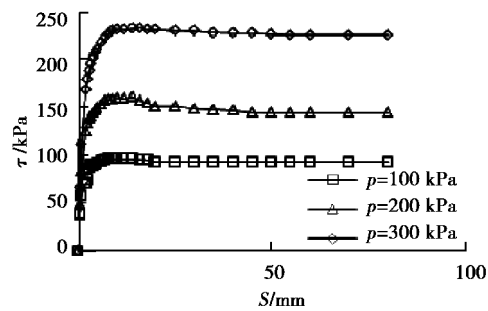


图 3 泾阳黄土在不同竖向应力条件下的剪应力-位移关系曲线

Fig. 3 Shear stress and displacement relation curves of Jingyang loess under different vertical stresses

显,竖向应力越大,残余强度也越大,且差值比较显著。研究表明,试样剪切面形成以后,粘聚力对残余强度的影响很小,对残余强度影响较大的是摩擦力,竖向应力越大,摩擦力越大,故残余强度也越大。

2.4 干密度对不同地区黄土残余强度的影响

以兰州黄土为例,控制干密度为 $\rho_d = 1.43 \text{ g/cm}^3$ $\rho_d = 1.53 \text{ g/cm}^3$ $\rho_d = 1.63 \text{ g/cm}^3$,研究在 $w = 16\%$ 、 $v = 1.0 \text{ mm/min}$ 、 $\sigma = 200 \text{ kPa}$ 情况下干密度对残余强度的影响,建立剪应力-位移曲线如图 4。

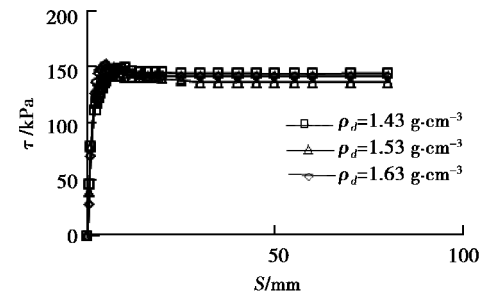


图 4 兰州黄土在不同干密度情况下的剪应力-位移关系曲线

Fig. 4 Shear stress and displacement relation curves of Lanzhou loess under different dry densities

干密度反映的是土体内部密实情况及可压缩性。干密度大的试样,土颗粒之间比较密实,而干密度小的试样,内部比较松,剪切过程中先压密再形成剪切面。从图 4 中可以看出,干密度对黄土残余强度的影响不明显,主要是因为剪切面附近颗粒形成新的定向排列之后,密度趋于一致。

2.5 各地区黄土残余强度对比分析

由以上分析可知,竖向应力对不同地区黄土的残余强度影响较大,但在同一竖向应力条件下,不同

地区黄土的残余强度略有差别。在 $\rho_d = 1.53 \text{ g/cm}^3$ 、 $w = 16\%$ 、 $v = 1.0 \text{ mm/min}$ 情况下,各地黄土的残余强度如表 4。可以看出,竖向应力较小时,不同地区黄土残余强度差异不明显,竖向应力为 300kPa 时,不同地区黄土残余强度差别略大,但统一表现为同一竖向应力作用下,泾阳黄土的残余强度略大于其他两地区的残余强度。何蕾^[11]认为粘性土抗剪强度首先受黏粒含量及矿物组成控制,含有伊利石的试样残余内摩擦角显著高于含有蒙脱石的,且伊利石与高岭石颗粒粒径较粗,残余内摩擦角较高,而泾阳黄土中黏粒含量及伊利石、高岭石的含量均高于另外两个地区导致残余强度略高,与之结果相符。

表 4 不同地区黄土在同一竖向应力作用下的残余强度

Table 4 Residual strength of loess in different regions under the same vertical stress

竖向应力 P/kPa	残余强度 τ_r/kPa		
	泾阳	子洲	兰州
100	93	86	92
200	144	143	136
300	226	210	202

在竖向应力为 200 kPa 时,对各地区黄土在不同含水率、剪切速率及干密度的情况下进行环剪试验,比较 3 个地区黄土的残余强度值,汇总各个地区黄土残余强度较大的情况如下:

表 5 兰州黄土残余强度较大的情况

Table 5 The maximum residual strength of Lanzhou loess

含水率/%	剪切速率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\tau_{r,1Z}$ /kPa	D_{\min}	$\tau_{r,\min}$ /kPa	差值 Δ /kPa
19	1.0	1.43	138	泾阳	125	13
19	5.0	1.43	143	泾阳	118	25
19	0.1	1.43	143	子洲	128	15
19	1.0	1.53	145	子洲	131	14
19	5.0	1.53	148	子洲	117	31
19	0.1	1.53	149	子洲	125	24
19	1.0	1.63	145	子洲	125	20
19	5.0	1.63	144	子洲	116	28
19	0.1	1.63	146	子洲	122	24

兰州黄土残余强度较大时,剪切速率可能是 1.0 mm/min、5.0 mm/min、0.1 mm/min,干密度可能是 1.43 g/cm³、1.53 g/cm³、1.63 g/cm³,而含水率都是 19%。可以看出,兰州黄土残余强度较大时,含水率较大,均为 19%。一方面是因为兰州黄土中的易溶盐含量相对其他两个地区较高,当土样中含水丰富的时候,易溶盐充分溶解,增加颗粒间的联接,增强了土体的抗剪强度;另一方面,根据颗粒分析试验,子洲黄土粒径大于 0.075 mm 的颗粒(即粗颗粒)含量较多,而泾阳黄土中粒径小于 0.005 mm 的颗粒(即粘粒)含量较多。当含水率较大时,水的存在对细颗粒之间的粘聚力及对粗颗粒之间的咬合摩擦力均有一定的削弱作用,故当含水率较大时,兰州黄土残余强度偏大,且与较小的残余强度差值在 13~31 kPa 之间。

表 6 子洲黄土残余强度较大的情况

Table 6 The maximum residual strength of Zizhou loess

含水率/%	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	干密度/ (g·cm ⁻³)	τ_{rJY} /kPa	D_{min}	τ_{rmin} /kPa	差值 Δ /kPa
16	1.0	1.63	152	泾阳	142	10
13	1.0	1.63	159	兰州	144	15
16	5.0	1.63	158	泾阳	148	10
13	5.0	1.63	172	兰州	146	26
16	0.1	1.63	152	兰州	140	12
13	0.1	1.63	166	泾阳	148	18

子洲黄土残余强度较大时,剪切速率可能是 1.0 mm/min、5.0 mm/min、0.1 mm/min,含水率可能是 13%、16%,而干密度都是 1.63 g/cm³。通过击实试验得出,子洲黄土的最优含水率为 16.2%,对应的最大干密度为 1.70 g/cm³。可以看出,当含水率小于最优含水率,同时干密度较大(约为最大干密度的 96%)时,子洲黄土的残余强度较大,且与较小的残余强度差值在 10~26 kPa 之间。由于子洲黄土中粗颗粒含量较多,干密度较大时,土颗粒之间比较密实,咬合连接作用比较强,同时含水率较小,降低了土颗粒之间的润滑和软化作用,故

对于子洲黄土而言,含水率较小且干密度较大时,残余强度较大。

泾阳黄土残余强度较大时,剪切速率可能是 1.0 mm/min、5.0 mm/min、0.1 mm/min,含水率可能是 13%、16%,干密度可能是 1.43 g/cm³、1.53 g/cm³。泾阳黄土的天然含水率为 16.2%,最优含水率为 18.1%,对应的最大干密度为 1.70。可以看出,当含水率小于最优含水率同时干密度较小(小于或等于最大干密度的 90%)时,泾阳黄土残余强度较大,且与较小的残余强度差值在 7~33 kPa 之间。泾阳黄土中细粒含量较多且粒径小于 0.005 的颗粒(即黏粒)所占比重较大,由于毛细水的表面张力作用,在土骨架间引起毛细压力,毛细压力具有连接土颗粒的作用,增强土的抗剪强度;并且含水率较大时,剪切面附近易形成泥浆薄层,对抗剪强度不利。故对于泾阳黄土而言,含水率较小且干密度较小时,残余强度较大。

表 7 泾阳黄土残余强度较大的情况

Table 7 The maximum residual strength of Jingyang loess

含水率/%	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	干密度/ (g·cm ⁻³)	τ_{rJY} /kPa	D_{min}	τ_{rmin} /kPa	差值 Δ /kPa
13	1.0	1.43	168	兰州	145	23
16	1.0	1.43	168	兰州	144	24
13	5.0	1.43	163	兰州	146	17
16	5.0	1.43	155	兰州	149	6
13	0.1	1.43	164	兰州	145	19
16	0.1	1.43	170	子洲	137	33
13	1.0	1.53	156	兰州	148	8
16	1.0	1.53	144	兰州	136	8
13	5.0	1.53	151	子洲	144	7
16	5.0	1.53	154	子洲	147	7
13	0.1	1.53	174	兰州	152	22
16	0.1	1.53	162	兰州	144	18

注: D_{min} 为对应的残余强度较小的地区; τ_{rmin} 为对应的较小的残余强度

3 结论

(1)针对不同地区的黄土,分别研究了不同剪切速率、不同含水率、不同竖向应力、不同干密度条件下的残余强度,分析各种情况下的剪应力-位移曲线,得出竖向应力对残余强度的影响较大,其次是含水率、剪切速率、干密度。

(2)对3个地区黄土的残余强度进行汇总分析比较,根据颗粒分析试验结果,得出对于粉粒含量较多的兰州黄土,含水率为19%时对应的残余强度较大;对于粗粒含量较多的子洲黄土,含水率小于最优含水率同时干密度为 $1.63\text{g}/\text{cm}^3$ 时对应的残余强度较大;对于黏粒含量较多的泾阳黄土,含水率小于最优含水率同时干密度较小时对应的残余强度较大。

参考文献(References)

- [1] 许领,戴福初,闵弘.黄土滑坡研究现状与设想[J].地球科学进展,2008,23(8):236-242. (Xu Ling, Dai Fuchu, Min Hong. Research status and assumption of loess landslides [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(8):236-242. (in Chinese))
- [2] 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(增):616-618. (Tan Wenhui, Ren Fenhua, Miao Shengjun. Influence of parameters of peak strength and residual strength on the reinforcement of slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Supp.): 616-618. (in Chinese))
- [3] 任光明,聂德新.大型滑坡滑带土结构强度再生特征及其机理探讨[J].水文地质工程地质,1997(3):28-31. (Ren Guangming, Nie Dexin. Research on the structure strength restoration characteristics and mechanism of large landslide zone soil [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997(3): 28-31. (in Chinese))
- [4] 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. (Tian Bin, Dai Huichao, Wang Shimei. Strength characteristics of soil in slide zone and

determination of its parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (17): 2887-2892. (in Chinese))

- [5] 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. (Zhou Pinggen. Estimation method of slide zone soil strength parameters [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998(6): 30-32. (in Chinese))
- [6] 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(增):197-201. (Ding Shuyun, Bi Qingtao, Cai Zhengyin, et al. Test procedures for ring shear apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Supp.): 197-201. (in Chinese))
- [7] 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. (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. (in Chinese))
- [8] 刘动,陈晓平.滑带土残余强度的室内试验与参数反分析[J].华南理工大学学报,2014,42(2):81-87. (Liu Dong, Chen Xiaoping. Laboratory tests and parameters back analysis of the residual strength of slip zone soil [J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42(2): 81-87. (in Chinese))
- [9] 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. (Liao Jianmin, Wu Yiping, Ou Guangzhao, et al. Shear strength behavior of slide zone soil in ring shear tests [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(10): 92-95. (in Chinese))
- [10] Kamai T. Monitoring the process of ground failure in repeated landslides and associated stability assessments [J]. Engineering geology, 1998, 50(1): 71-84.
- [11] 何蕾.矿物成分与水化学成分对粘性土抗剪强度的控制规律及其应用[D].北京:中国地质大学,2014. (He Lei. Impact of mineralogical composition and water chemistry on the shear strength of clay and its application [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese))