



# 某滑坡滑带土特征三轴压缩试验研究

熊荣军, 唐正涛, 孙爱国

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 通过巴东地区某滑坡滑带土的天然含水率与密度试验、土粒比重试验、颗粒分析试验、界限含水率试验、击实试验以及不同剪切速率的滑带土重塑样的三轴固结不排水剪试验, 探讨不同剪切速率条件下滑带土抗剪强度参数的变化趋势, 分析滑带土试样的应力-应变关系, 揭示滑带土的物理力学特征及其对滑坡的影响, 以期对该类型滑坡的防治提供有价值的建议。

**关键词:** 滑带土; 固结不排水剪切; 剪切速率; 抗剪强度; 应力-应变关系

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0049-06

## Experimental study on tri-axial compression test about sliding soil characteristics of landslide

XIONG Rong-jun, TANG Zheng-tao, SUN Ai-guo

(Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Based on the natural moisture content and density test, specific gravity test, grain size analysis tests, water content limits test, compaction test and tri-axial consolidated undrained shear test of remodeling sample of sliding soil under different shear rates for the sliding zone soil of a landslide in Badong area, we explore the change trend of shear strength parameters of the sliding zone soil under different shear rates, analyze the stress-strain relations of the sliding zone soil samples, reveal the physical and mechanical characteristics of sliding soil and its effects on the landslide, hoping to offer valuable basic recommendations for the prevention and cure of this type of landslides.

**Key words:** sliding zone soil; consolidated undrained shear; shear rate; shear strength; stress-strain relationship

滑坡的一个很重要的特征就是它具有一个或多个相对明显的滑动带, 位于滑体与滑床之间, 是滑体沿之滑动、与滑床相接触的面<sup>[1-2]</sup>。滑动带岩土的物理力学性质是滑坡稳定性分析及评价的必要条件<sup>[2]</sup>, 而滑动带岩土的强度特征及应力应变状态也决定着滑坡能否发生。由于滑动带在滑坡稳定性中的作用至关重要, 国内外诸多学者先后对滑带岩土的强度特征进行了系统而深入的研究<sup>[3-9]</sup>, 在滑带土室内的三轴压缩试验方面也取得了很多研究成果, 但对滑带土进行不同应变速率下的强度变化特征及应力应变规律这方面的研

究相对较少。因此, 对滑坡滑带土进行深入的室内三轴压缩试验研究, 研究其强度性质、变形规律及孔压变化特征等, 对滑坡的稳定性评价及预测预报具有重要的实际应用价值。

### 1 研究内容

1) 对滑带土进行一系列常规的土工试验, 如比重试验、颗粒分析试验及击实试验等, 得出并分析滑带土的基本物理性质。研究三轴压缩试验的操作步骤及操作方法, 使试样的饱和度达到理论要求并尽量降低试验数据的离散性, 以得出尽

收稿日期: 2013-03-28

作者简介: 熊荣军(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察及试验检测工作。

可能合理的试验数据。

2) 对滑带土进行不同剪切速率的三轴固结不排水剪试验, 研究滑带土的应力-应变关系、孔隙水压力与轴向应变的关系。描述滑带土的应力-应变关系特征, 为滑坡的预测预报提供依据。

3) 利用莫尔-库伦理论得出不同剪切速率下滑带土的抗剪强度及强度参数, 探讨抗剪强度及

强度参数随应变速率的变化规律, 为滑坡的稳定性评价及防治提供建议和参考。

## 2 滑带土物理参数试验

通过对滑带土进行一系列物理试验, 得出滑带土的天然含水率、天然密度、比重、孔隙比等物理参数, 见表1。

表1 滑带土物理参数

天然含水率 $\omega$ /%	天然密度 $\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	比重 $G_{sm}$	孔隙比 $e$	$C_u$	$C_c$	塑限 $w_p$ /%	液限 $w_L$ /%	$I_p$	$I_L$	$\omega_{opt}$ /%	$\rho_{dmax}$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )
13.7	2.28	2.701 4	0.344	>5	<1	12.3	24.9	12.6	0.11	10.9	1.949

从表1中可以看出,  $C_u > 5$ 且 $C_c < 1$ , 所以判定该滑带土为级配不良的非均粒土, 并且根据不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 还可以评定该滑带土为渗透性较好的土。并且 $0 < I_L \leq 0.25$ ,  $10 < I_p \leq 17$ , 根据《岩土工程勘察规范》(2009), 表明天然状态下该滑带土可定名为含碎石角砾的硬塑粉质黏土。

## 3 滑带土三轴固结不排水剪试验

由于滑带土是处于三向应力状态, 而正是基于实际的应力状态的考虑, 三轴试验仪能够提供三向应力, 以尽量模拟实际情况。并且三轴试验仪能较好地控制排水条件而且可以测量试验过程中试样内孔隙水压力的变化, 试样中的应力状态也比较明确, 破裂面不是人为确定, 而是强度最弱处。所以利用三轴压缩试验对滑带土的强度、应力应变等特性进行研究更具有实际的参考价值。

### 3.1 试验方案

按照最优含水率10.9%和最大干密度 $1.949 g/cm^3$ 控制制样, 并且一组试验的试样一次性制成。试样的规格为底面积 $S=12 cm^2$ , 高度 $H=8 cm$ , 体积 $96 cm^3$ 。

固结不排水剪试验剪切应变速率黏土宜为每分钟应变0.05%~0.1%, 即0.04 ~ 0.08 mm/min, 按应变速率0.06%/min (0.048 mm/min), 0.075%/min (0.06 mm/min), 0.1%/min (0.08 mm/min) 分别做2组试验数据较合理、较成功的试验, 共6组; 每组至少做3个试样, 固结围压分别为200, 300, 400 kPa, 见表2。

表2 固结不排水剪试验方案

应变速率	组数	固结围压/kPa
0.06 %/min(0.048 mm/min)	2	200
		300
		400
0.075 %/min(0.06 mm/min)	2	200
		300
		400
0.1 %/min(0.08 mm/min)	2	200
		300
		400

### 3.2 试验数据可靠性分析

对试验中的试样都进行了抽气饱和与反压饱和, 并量测了孔隙压力系数 $B$ 值, 全部大于0.95, 表明试验中的试样都达到了饱和要求, 见表3, 并且试样都是按照最优含水率10.9%和最大干密度 $1.949 g/cm^3$ 制成, 实测含水率在 $\pm 1%$ 范围内。为避免不同仪器之间的误差, 所有试验都在同一台仪器上进行。试验结果可靠, 完全可以为统计分析, 数值模拟等研究所应用。

表3 试样的孔隙压力系数 $B$ 值

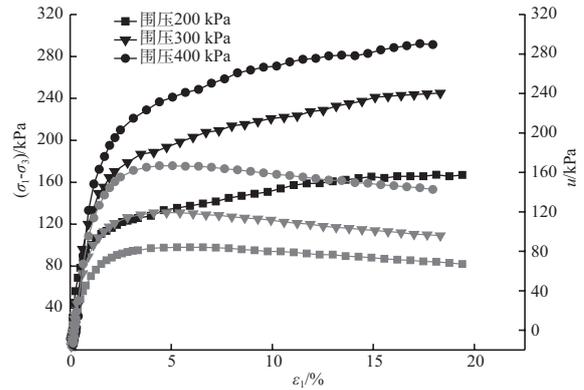
试验编号	剪切速率/( $mm \cdot min^{-1}$ )	试样编号	$B$ 值
HTP-2	0.048	5-4	0.99
		5-2	0.98
		5-7	0.99
HTP-3	0.060	6-1	0.96
		6-2	0.96
		6-3	0.98
HTP-4	0.060	6-4	0.98
		6-5	0.98
		6-8	0.98
HTP-5	0.080	7-3	0.98
		7-4	0.96
		7-5	0.96

### 3.3 偏应力、孔压与应变的关系分析

在一部分试验剪切开始前, 由于活塞与试样帽接触不够充分, 导致剪切初始一小阶段的数据出现误差, 所以首先对这部分的数据进行了校正。分别对3个剪切速率0.048, 0.06, 0.08 mm/min条件下各组试验的主应力差与轴向应变、孔隙水压力与轴向应变的关系曲线分别进行了绘制(图1~4), 并分别对同一围压300, 400 kPa下不同剪切速率的主应力差(即偏应力)与轴向应变的关系曲线做了绘制(图7, 8)。通过对图1~6中的曲线变化分析可知, 该滑坡重塑滑带土的应力-应变、孔压-应变有如下特性:

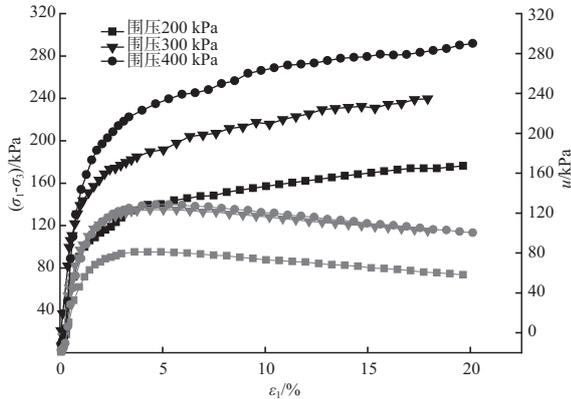
1) 通常情况下, 像混凝土和金属等类似坚硬材料在受压变形时, 初始阶段为直线, 材料表现为弹性变形, 当应力达到某一临界值后, 应力应变关系开始转变为曲线, 材料同时存在弹性变形

和塑性变形。该滑坡重塑滑带土试样的应力应变关系也表现为类似特性, 试验初始阶段主应力差随着轴向应变的增加而基本上呈线性迅速增大, 表明在该阶段试样接近于线弹性变形, 但该直线段很小, 轴向应变大概只有1%左右。在轴向应变



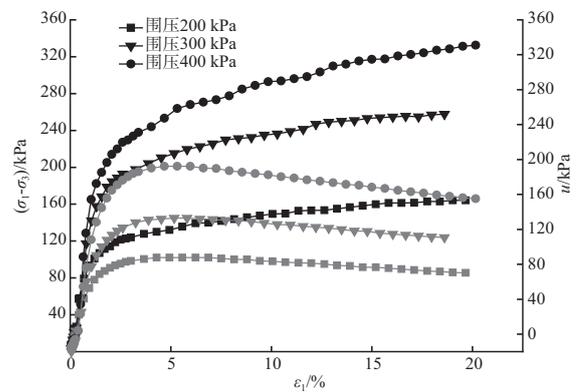
注: 黑色表示主应力差与轴向应变关系曲线; 灰色表示孔隙水压力与轴向应变关系曲线。

图3 HTP-4 (剪切速率0.06 mm/min)



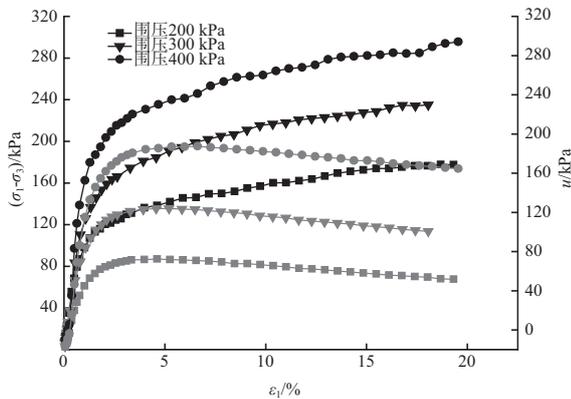
注: 黑色表示主应力差与轴向应变关系曲线; 灰色表示孔隙水压力与轴向应变关系曲线。

图1 HTP-2 (剪切速率0.048 mm/min)



注: 黑色表示主应力差与轴向应变关系曲线; 灰色表示孔隙水压力与轴向应变关系曲线。

图4 HTP-5 (剪切速率0.08 mm/min)



注: 黑色表示主应力差与轴向应变关系曲线; 灰色表示孔隙水压力与轴向应变关系曲线。

图2 HTP-3 (剪切速率0.06 mm/min)

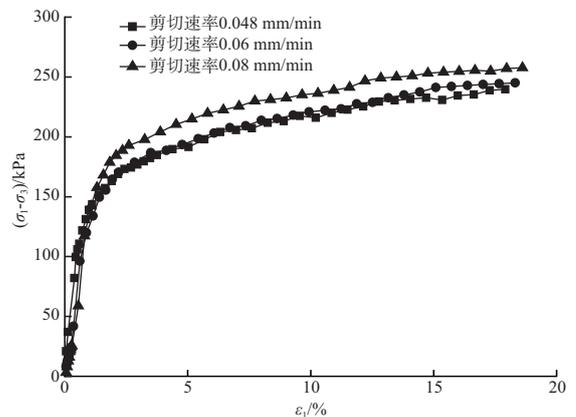


图5 300 kPa围压下不同剪切速率的主应力差与轴向应变关系曲线

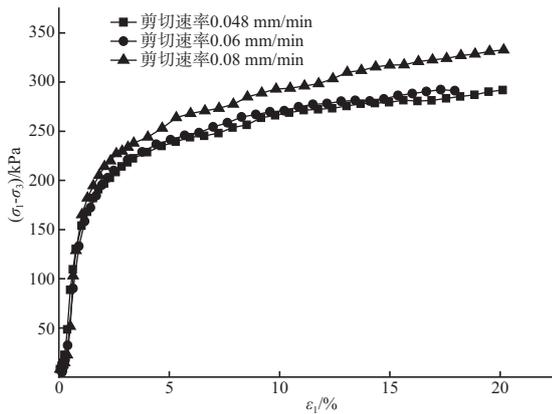


图6 400 kPa围压下不同剪切速率的主应力差与轴向应变关系曲线

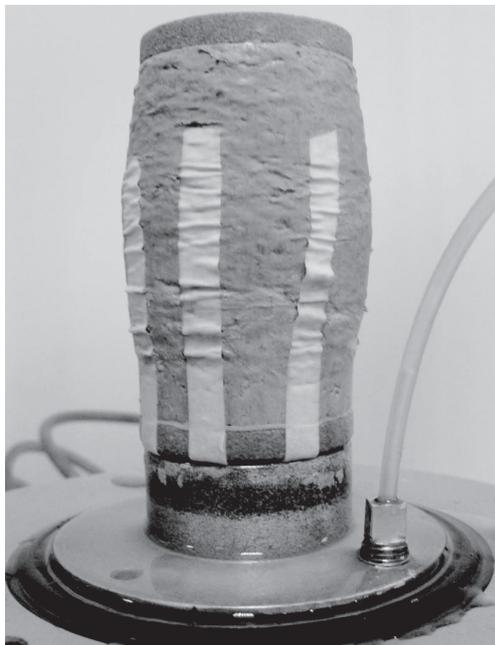


图7 剪缩后的试样

1%之后, 试样进入了屈服阶段, 有学者认为, 在该阶段由应力增加的应变中, 既有可恢复的弹性变形, 也包括有显著的不可恢复的塑性变形, 土体表现为弹塑性变形。

2) 主应力差 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 随着轴向应变  $\epsilon_1$  的增加而一直增大, 在曲线上表现为一直上升的趋势, 即没有出现明显的峰值点, 试样在剪切过程中结构变得更紧密, 表现为剪缩 (图7), 因而强度也在提高, 呈现应变硬化特性。并且在同一轴向应变时, 主应力差基本上随着围压的增大而增大的, 只是在有些试验初始阶段会出现些许的偏差, 这可能与一组试样中制样的差异性、试样

剪切开始前活塞与试样帽接触的松紧及试样饱和度的细小差别等因素有关, 但不影响总体趋势。

3) 同一围压、相同轴向应变条件下, 主应力差随着剪切速率的增大而增大。原因可能是在剪切时剪切速率越大, 试样结构紧密的越快, 表现在强度上增加的越快。

4) 在剪切初始阶段, 孔隙水压力随着轴向应变的增加迅速增大, 大概在轴向应变4%左右达到峰值, 随后曲线变缓, 孔隙水压力逐级减小。这是由于在剪切初始阶段, 试样土颗粒之间的孔隙很多没有贯通, 在轴向偏应力的作用下, 孔隙水压力迅速增大并很快达到峰值; 随着剪切的进行、试样土颗粒的移动, 颗粒之间的孔隙逐级贯通, 孔隙水压力便会慢慢消散。图1中围压300, 400 kPa下的孔隙水压力与轴向应变关系曲线很接近, 原因是孔压管道内进入空气, 在剪切的过程中, 空气具有一定的可压缩性, 不能完全传递压力, 导致400 kPa围压下的孔隙水压力偏小。但是从图2~ 4中可以反映出在同一轴向应变时孔隙水压力基本上也是随着围压的增大而增大的。

### 3.4 抗剪强度参数分析

试验中由于主应力差与轴向应变关系曲线没有出现峰值, 则取轴向应变15%时为破坏点, 分别求得每组试验的3个试样在围压200, 300, 400 kPa下破坏时的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 及大主应力 $\sigma_{1f} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \sigma_{3f}$ , 以  $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$  为圆心、 $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$  为半径 ( $f$  注脚表示破坏), 绘制3个极限状态的应力圆, 按照极限平衡条件, 破坏应力圆的公切线就是莫尔-库伦强度包络线, 抗剪强度包线与纵坐标的截距即为土的粘聚力, 与水平轴的夹角

即为土的内摩擦角, 从而可以定出总应力抗剪强度参数  $C$ 、 $\phi$  值和有效应力抗剪强度参数  $C'$ 、 $\phi'$  值 (图8 ~ 10), 得到的强度参数见表4。

表4 抗剪强度参数

试验编号	剪切速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	C/kPa	$\phi$ (°)	C'/kPa	$\phi'$ (°)
HTP-2	0.048	36.3	11.1	31.4	15.2
HTP-3	0.060	25.2	12.4	18.5	19.1
HTP-4	0.060	23.8	12.5	19.0	19.1
HTP-5	0.080	19.5	14.4	14.8	22.4

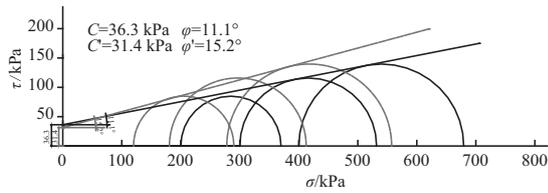


图8 HTP-2 (剪切速率0.048 mm/min) 强度包络线

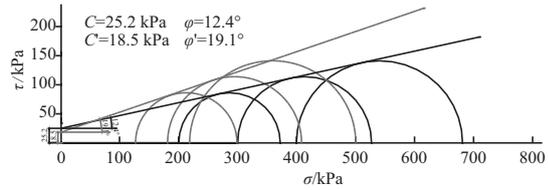


图9 HTP-3 (剪切速率0.06 mm/min) 强度包络线

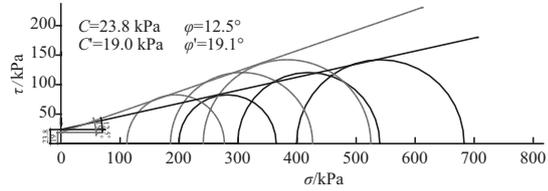


图10 HTP-4 (剪切速率0.06 mm/min) 强度包络线

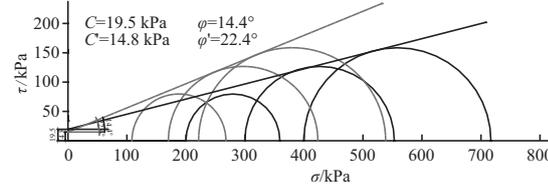


图11 HTP-5 (剪切速率0.08 mm/min) 强度包络线

对试验HTP-2、HTP-4、HTP-5对应的抗剪强度参数随剪切速率的变化做了绘制(图12, 13)。由图可知,粘聚力随剪切速率的增大而减小,并且在同一剪切速率时,C比C'大;内摩擦角随剪切速率的增大而增大,并且在同一剪切速率时,φ比φ'小。

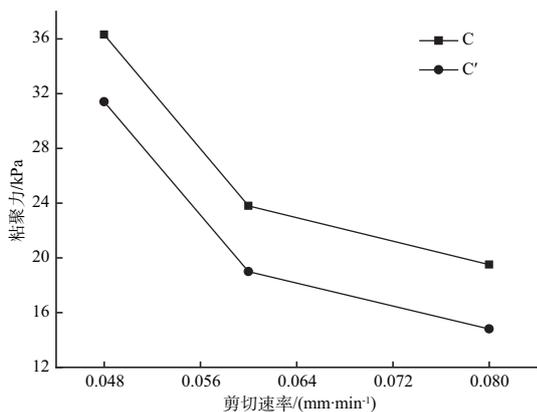


图12 粘聚力与剪切速率曲线

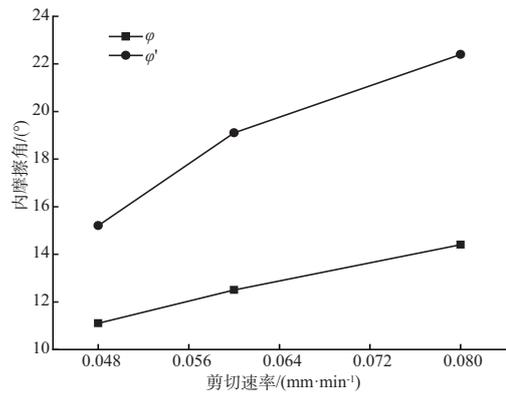


图13 内摩擦角与剪切速率曲线

### 3.5 抗剪强度分析

莫尔-库伦破坏准则是目前在生产实践中所广泛采用的破坏准则,根据该准则,结合试验数据,计算得出不同剪切速率、不同围压条件下该滑坡滑带土总应力抗剪强度和有效应力抗剪强度,见表5。

表5 滑带土抗剪强度

围压/ kPa	试验 编号	剪切速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	试样 编号	总应力 强度/kPa	有效应力 强度/kPa
200	HTP-2	0.048	5-4	88.99	82.63
	HTP-3	0.060	6-1	84.06	85.75
	HTP-4	0.060	6-4	82.50	80.22
	HTP-5	0.080	7-4	86.22	84.20
300	HTP-2	0.048	5-2	113.52	105.92
	HTP-3	0.060	6-2	110.82	112.14
	HTP-4	0.060	6-5	111.25	116.12
	HTP-5	0.080	7-5	120.97	124.24
400	HTP-2	0.048	5-7	136.91	137.56
	HTP-3	0.060	6-3	137.52	132.54
	HTP-4	0.060	6-8	137.17	141.23
	HTP-5	0.080	7-3	152.80	155.21

对试验HTP-2、HTP-4、HTP-5在围压300, 400 kPa下不同剪切速率的抗剪强度的变化做了绘制,如图14和15。由图14显示,300 kPa围压下的总应力抗剪强度大小变化与有效应力抗剪强度变化趋势出现交叉,总应力抗剪强度随剪切速率的变化出现波动,有效应力抗剪强度随剪切速率的增大而增大;图15显示,400围压下同一剪切速率的总应力抗剪强度比有效应力抗剪强度小,并且总应力抗剪强度和有效应力抗剪强度都随着剪切速率的增大而增大。对表5、图14及图15综合分析可知,同一剪切速率下抗剪强度随着围压的增大而增大,但并非线性增长。总体而言,可以得出

以下试探性的结果：同一围压同一剪切速率下有效应力抗剪强度呈现出大于总应力抗剪强度的特征，并且同一围压下总应力抗剪强度与有效应力抗剪强度都有随剪切速率增大而增大的趋势。不同围压下由于只做了3个剪切速率的固结不排水剪试验，数据有限，且存在离散性及误差，在以后的研究中，需要进一步增加不同剪切速率的试验，以进一步分析研究上述变化趋势。

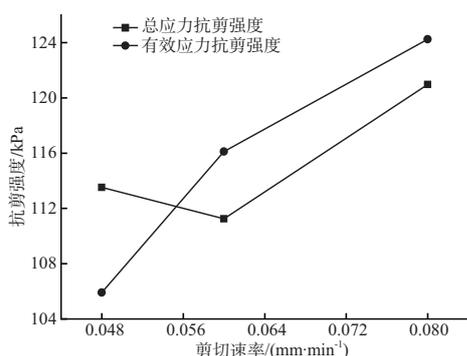


图14 围压300 kPa下不同剪切速率的抗剪强度比较

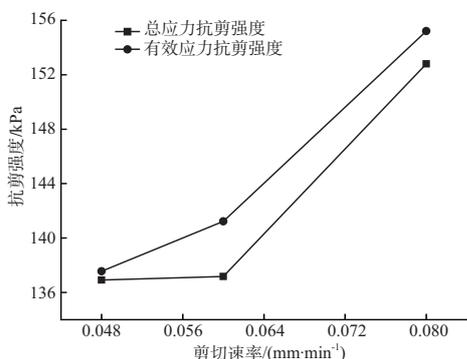


图15 围压400 kPa下不同剪切速率的抗剪强度比较

#### 4 结论

1) 对固结不排水剪试验的主应力差、孔压随轴向应变变化的试验曲线进行了分析，试验初始阶段主应力差随着轴向应变的增加而基本上呈线性迅速增大，表明在该阶段试样接近于线弹性变形，但该直线段很小，轴向应变大概只有1%左右。在轴向应变1%之后，试样进入了屈服阶段，并且主应力差随着轴向应变的增加而一直增大，没有出现明显的峰值点，表现为逐渐硬化的应变特性，试样在剪切过程中结构变得更紧密，表现出剪缩性。在同一组试验中，主应力差总体上随围压的增大而增大。在同一围压、相同轴向应变条件下，主应力差总体上随着剪切速率的增大而

增大。在剪切初始阶段，孔隙水压力随着轴向应变的增加迅速增大，大概在轴向应变4%左右达到峰值，随后曲线变缓，孔隙水压力逐级减小。并且在同一轴向应变时，孔隙水压力基本上也是随着围压的增大而增大的。

2) 根据莫尔-库伦破坏准则和极限平衡条件，得出了不同剪切速率条件下总应力抗剪强度参数和有效应力抗剪强度参数，粘聚力随剪切速率的增大而减小，内摩擦角随剪切速率的增大而增大。还得出不同剪切速率、不同围压条件下滑带土的总应力抗剪强度和有效应力抗剪强度，同一剪切速率下抗剪强度随着围压的增大而增大，但并非线性增长；总体而言，可以得出以下试探性的结果，即同一围压同一剪切速率下有效应力抗剪强度大于总应力抗剪强度，并且同一围压下总应力抗剪强度与有效应力抗剪强度都有随剪切速率增大而增大的趋势。由于数据有限，还需进行试验，以进一步研究上述变化规律。

#### 参考文献:

- [1] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [2] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] Skempton A W. First-time slides in over-consolidated clays[J]. Geotechnique, 1970, 20(3): 320-324.
- [4] Skempton A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Geotechnique, 1985, 35(1): 3-18.
- [5] Chandler R J. Back analysis techniques for slope stabilization works: A case record[J]. Geotechnique, 1977, 27(4): 479-495.
- [6] Mesri G, Abdel-Ghaffarmen. Cohesion intercept in effective stress-stability analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(8): 1 229-1 249.
- [7] 任光明, 聂德新. 大型滑坡滑带土结构强度再生特征及其机制探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(3): 28-31, 44.
- [8] 任光明, 聂德新, 左三胜. 滑带土结构强度再生研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(3): 7-12.
- [9] Gibo S, Egashira K, Ohtsubo M, et al. Strength recovery from residual state in reactivated landslides[J]. Geotechnique, 2002, 52(9): 683-686.