

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 12 - 3520 - 07

# 风化片岩残积土剪切特性研究

刘胜利<sup>1,2</sup>, 陈善雄<sup>3</sup>, 刘 伟<sup>3</sup>, 余 飞<sup>3</sup>, 罗红明<sup>3</sup>, 赵文光<sup>2</sup>

(1. 广州军区建筑设计院, 广州 510075; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院 控制结构湖北省重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 为考察片岩残积土的剪切特性, 结合鄂西北山区某边坡工程, 开展了风化岩残积土大型原位直剪试验, 研究了风化岩残积土的结构组成、剪切面破坏特性、剪切强度特性及其含石率、起伏度等相关关系。结果表明: 该风化岩残积土应力-应变曲线多呈应变硬化特征, 无明显峰值; 束状孤石和束状石组多为翻滚和啃断破坏, 起伏度随含石率的增大而增大, 近似呈线性关系; 爬坡效应会引起剪胀, 造成剪应力和垂直应力的增大; 随着垂直应力的增大, 剪切破坏机制逐渐由滑动破坏变为啃断破坏, 剪压应力比 (剪应力与垂直应力的比值) 逐渐减小。研究成果可为边坡工程变形及稳定性分析提供参考。

**关键词:** 风化片岩; 残积土; 直剪试验; 结构特性; 含石率; 起伏度; 剪压应力比

**中图分类号:** TU 459+.2

**文献标识码:** A

## Study of shear properties of weathered schist residual soil

LIU Sheng-li<sup>1,2</sup>, CHEN Shan-xiong<sup>3</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>, YU Fei<sup>3</sup>, LUO Hong-ming<sup>3</sup>, ZHAO Wen-guang<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Military Architectural Design Institute, Guangzhou 510075, China; 2. Hubei Key Laboratory of Control Structure,

College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** To study the shear property of weathered schist residual soil, in-situ direct shear tests was carried out at a slope project in northwest mountain area of Hubei province; and the structural composition, fracture characteristics, relationship of stone ratio and waviness and so on were analyzed. The results show that: The stress and strain curves show strain hardening features, and no obvious peak. The lonely stone and cluster stones are rolling and gnawing fracture in shear surface. There is an approximate linear relationship between waviness of shear surface and stone ratio; and the value of waviness increases with the increase of stone ratio. The climbing effect may cause shear dilation and increase of shear stress and normal stress. With increase of normal stress, the failure mechanism in shear surface turns sliding into gnawing fracture; and the ratio of shear-normal stress is in decrease. The results can be referenced for deformation and stability analysis of slope projects.

**Key words:** weathered schist; residual soil; direct shear tests; structural characteristics; stone ratio; waviness; ratio of shear-normal stress

## 1 引 言

边坡稳定问题是岩土工程中的一个重要问题, 抗剪强度指标是边坡稳定问题中的核心指标。目前常用来测定岩土体抗剪强度的试验方法有室内常规直剪试验、三轴压缩试验和大型直剪试验等。由于取样过程中的结构扰动因素, 室内测试方法通常不能真实反映原状土体的结构特性。因此, 要取得可

靠的土质参数, 只有通过现场测试<sup>[1]</sup>。而大型直剪试验因其广泛的适用性和反映实际强度的优良特性, 已经成为岩土工程测试的重要手段, 被广泛应用于土石混合料、土工织物、风化岩残积土、土石结合面、岩体软弱结构面等岩土工程中的各个领域。

魏厚振等<sup>[2]</sup>研究了蒋家沟滑坡砾石土扰动试样不同粗粒含量与抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  的影响关系; 冯俊德等<sup>[3]</sup>研究了冰渍土的抗剪强度变化特征; 谭

收稿日期: 2012-08-15

基金项目: 2010 年国家自然科学基金资助项目 (No. 51079142)

第一作者简介: 刘胜利, 男, 1980 年生, 博士, 现从事结构、岩土工程等方面的设计和研究工作。Email: liukaifei523@sina.com

捍华等<sup>[4]</sup>对千枚岩扰动土击实试样进行了室内大型直剪试验；Roggensack<sup>[5]</sup>利用室内大型直剪试验来研究湖水冰的抗剪强度；Liu 等<sup>[6]</sup>研究了渥太华砂、级配不良砾石、级配良好砾石土、红壤土和 6 种不同孔径土工格栅界面的抗剪强度特性；Zekkos 等<sup>[7]</sup>研究了垃圾土的组成、侧向应力、重度、加载速率与垃圾土应力-应变间的相互关系；Xu 等<sup>[8]</sup>研究了不同岩石含量对土石混合料抗剪强度的影响。以上均采用室内大型直剪试验，主要针对扰动击实土、土石混合料、土工格栅等材料，考察了含石率与抗剪强度的影响关系，但不能考察材料的原状结构特性。

张玉成等<sup>[9]</sup>通过对黏土质边坡现场直剪试验测定土体推剪破裂面，利用极限平衡法反算出土体的抗剪强度；董云等<sup>[10]</sup>对路堤土石混合填料试样进行了现场和室内大型直剪试验；彭月英<sup>[11]</sup>对某矿山边坡花岗岩残积土进行了室内外直剪试验；刘斯宏等<sup>[12]</sup>对宜兴抽水蓄能电站上库堆石料进行了直剪试验。以上采用现场大型直剪试验和室内试验，考虑了原状土的结构特性，但着重抗剪强度参数的选取，对土的原状结构及其变形和破坏特性研究较少。

武当群变质片岩在鄂西北山区广泛分布，该类岩石多为易风化软岩，风化残积层往往较厚，受结构特征和变形特性的影响，其力学特性对边坡稳定、支护工程有很大影响。鉴于该风化岩取样困难，不便进行室内剪切试验，现场大型剪切试验研究成果又甚为稀少，本文结合十堰地区某隧道边坡工程，从残积土的结构特征入手，通过风化软岩残积土原位大型直剪试验，研究了风化岩残积土的结构组成、剪切面破坏特性、剪切强度特性及其含石率、起伏度等的相关关系，得出一些有益的研究结果，可为边坡削坡、隧道开挖工程中边坡的变形、破坏及稳定性分析提供参考。

## 2 试验材料与设备

十堰地区某隧道边坡分布武当山群绢云母绿泥片岩，纤维束状结构，具有明显的各项异性特性<sup>[13]</sup>。X 射线分析结果显示，主要成分为绢云母（30%）、绿泥石（25%）、石英（25%）和长石（20%）。由于绢云母和绿泥石含量较高，原岩易风化，且风化岩体经扰动后容易破碎，颗粒的原状排列被打破，容易失去结构性，图 1 为风化岩的崩滑堆积体，可见组成该片岩矿物具有定向排列结构特征。

为了对该风化片岩的颗粒组成有个初步了解，取直剪试验后剪切面上的土体进行颗粒分析，结果

见图 2。分析结果显示，2~40 mm 为扰动土的主要粒径分布，大于 0.075 mm 颗粒含量接近 95%，粗颗粒含量高。



图 1 风化片岩崩滑堆积体

Fig.1 Slumping mass of weathered schist

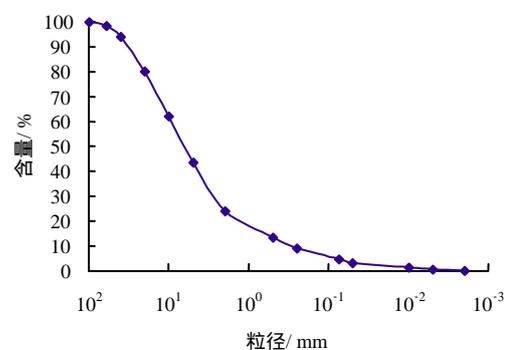


图 2 颗粒分析结果

Fig.2 Result of grain size analysis

试验设备采用中国科学院武汉岩土力学研究所与香港大学联合研制的应变控制式大型现场和室内两用直剪设备。该仪器属拼装式结构，剪切盒的净空几何尺寸为 500 mm×500 mm×410 mm，采用应力-应变传感器、DC-104A 型数据采集仪实现数据的自动采集。该装置量测的位移精度为 0.000 2 mm，荷载精度为 0.02 kN，最大剪切位移为 140.0 mm，剪切位移速率可控制在 0.003 6~0.060 0 mm/s。研究证明，该大型直剪仪具有较大的优越性<sup>[14]</sup>，良好的可靠性和实用性<sup>[15]</sup>。

为减少对原状土结构的扰动，试样开挖与修整均采用人工完成，选用 50、100、200、300 kPa 4 个级次的垂直应力，以 0.020 0 mm/s 的剪切速度对试样进行推剪，在剪切位移达到 60 mm 以上时停止试验，保存数据。推剪完成后，对剪切面进行起伏度量测、地质描述和拍照，并取剪切破坏面土体进行含水率测定。

## 3 试验结果及分析

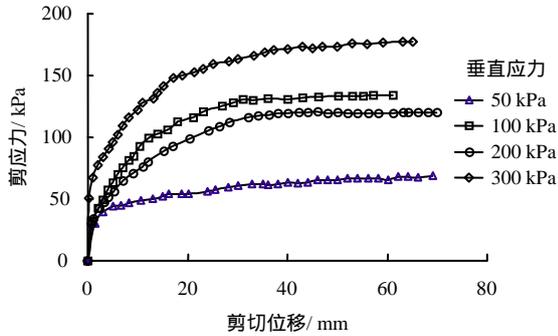
取两组大型直剪试验结果进行分析，两组试样

平均含水率分别为 12.65%和 11.43%，两者比较接近，可认为是平行试验。

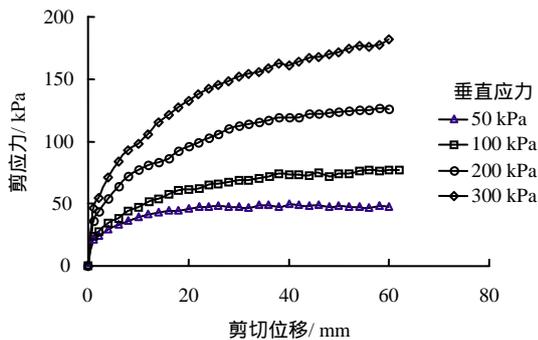
### 3.1 应力-应变曲线特征

两组试样的应力-应变曲线见图 3。两组试样应力-应变均表现出相同的塑性变形特征，即应力前期增长较快，后期增长减缓，曲线斜率（剪切刚度）由大变小呈现连续变化过程，无明显的峰值强度和应力降，残余强度变化很小甚至无变化。

具体情况是：第 1 组试样的第 2（100 kPa）、3（200 kPa）试样，当剪切位移超过 35 mm 以后应力不再增加；而第 1（50 kPa）、4 个试样（300 kPa）应力仍在缓慢增大，呈应变硬化的特征；第 2 组试样，第 1 试样在剪切位移达 25 mm 后应力便不再增长，而其他 3 个试样应力随剪切位移的增大而增大，表现出应变硬化特征。



(a) 第 1 组试样剪应力-位移关系曲线



(b) 第 2 组试样剪应力-位移关系曲线

图 3 剪应力位移关系曲线

Fig.3 Stress-displacement curves

第 1 组试样中，第 2 试样应变曲线始终高于第 3 试样应变曲线，表明剪切强度大于 200 kPa 试样，并在剪切过程中剪切盒不断上翘，这是由于试样成分、土石结构和破坏形态的不同造成的，具体情况详见后文分析。

### 3.2 剪切破坏特征

#### (1) 试样成分与剪切破坏形态

试样中存在 3 种不同颗粒形态，即土、孤石和束状石组，其中孤石为散落在土体中的圆形块石（粒径通常在 40 mm 以上）或不与其他束状石相连的束状石组，束状石组主要是未经扰动的风化岩群。3 种成分在剪切过程中分别呈现不同的破坏形态，见图 4，土主要呈剪切摩擦破坏，破裂面与剪切平面一致；孤石发生翻滚或平移，突兀于剪切平面上或在剪切平面上留下凹坑，剪切面近似呈弧形；束状石组常为束状聚集，保留原岩的产状结构，剪切过程中与剪切方向相交的束状石往往被剪断或发生束状滑移，使得剪切破坏面近似呈锯齿形状。由于上述 3 种不同颗粒的存在，试样在剪切过程中呈现出不同的剪胀效应。

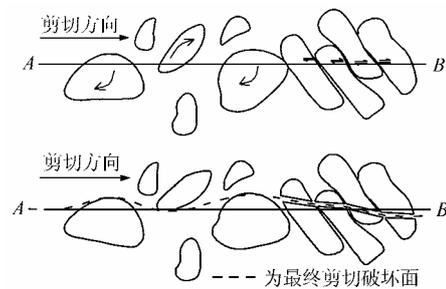


图 4 剪切面土、石破坏特征

Fig.4 Fracture features of Rock&soil shear surface

#### (2) 风化程度与破坏面形态展示

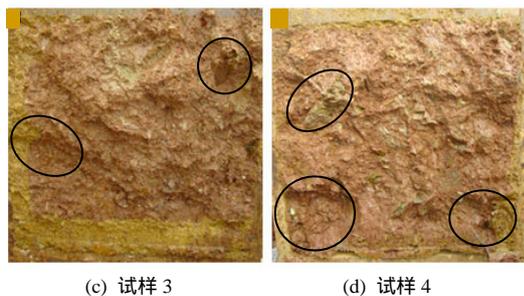
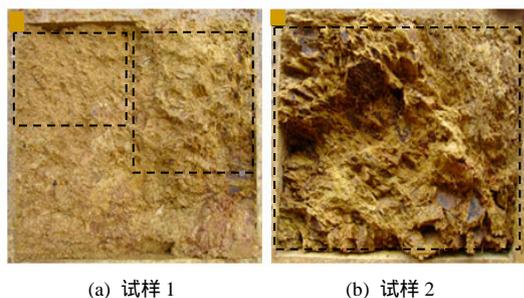
岩体的风化程度不同会造成试样土石成分和结构强度的差异，图 5 是第 1 组 4 个试样的上剪切面，(a)~(d)分别对应 50~300 kPa 的垂直应力。从图中可以看出，图 5(b)为强风化岩，倾向与剪切平面约成 35° 相交，试样几乎全由束状石组所构成，结构强度较高，剪切面起伏度很大；图 5(a)接近全风化，剪断面有束状断裂擦痕，剪切面起伏度不大；图 5(c)、(d)为红色坡积土夹杂风化碎石，剪切过程中，在风化碎石位置形成突起或凹坑，起伏度便由此形成。

图 6 为第 2 组试样剪切面揭露图，外观上见图 6(b)风化程度较其他试样稍弱一些，但整体相差不多，试样成分和结构差别也较第 1 组小。

由于试样未经扰动，剪切面上未发现圆形孤石存在，仅存在散落的束状孤石，因此，可将束状孤石并入束状石组来考察含石率对剪切特性的影响。

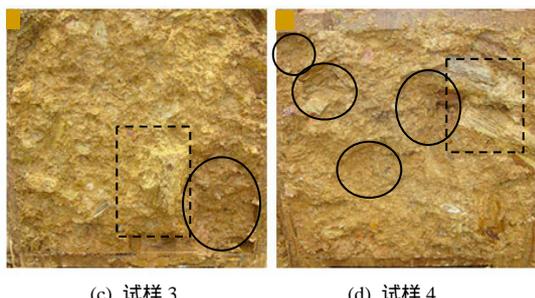
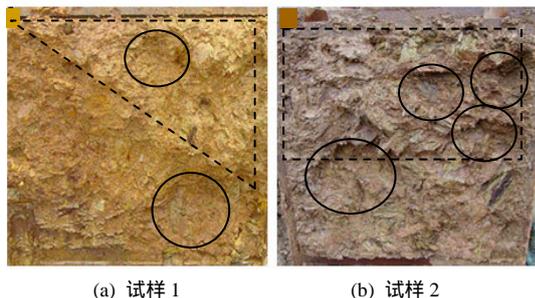
#### (3) 剪切面起伏度

起伏度通常指单位面积上最高位置和最低位置的高度差，由于剪切面积相同，这里把起伏度定义为该剪切面内最高位置和最低位置的高度差。两组试样量测的剪切面起伏度见表 1。



注：实线圈内为孤石所在处，虚线框内为束状石

图 5 第 1 组试样上剪切面揭露图  
Fig.5 Features of revealed shear surface of first set samples



注：实线圈内为孤石所在处，虚线框内为束状石

图 6 第 2 组试样上剪切面揭露图  
Fig.6 Features of revealed shear surface of second set samples

表 1 剪切面起伏度汇总表 (单位: cm)

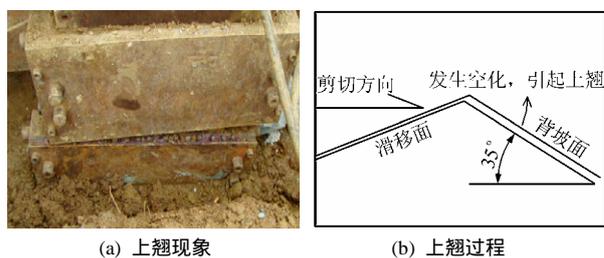
Table 1 Summary of waviness of shear surface (unit: cm)

组别	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	平均值
第 1 组	7.5	13.6	3.1	4.5	7.2
第 2 组	8.0	8.9	6.0	7.0	7.5

表 1 结果显示，第 1 组起伏度值较为离散，试样 2 起伏度值高达 13.6 cm，约为平均值的 2 倍，这主要与风化程度、试样含石率、结构强度有关。试样 2 风化程度弱，含石率高，结构强度高，因此，起伏度大。第 2 组试样的风化程度相差较小，因此，起伏度较为均一。

(4) 前述情况的分析

图 3(a)第 1 组第 2 试样曲线总高于第 3 试样，即出现了在垂直应力相对较小而剪切强度却较高的情况，并在剪切过程中出现剪切盒上翘现象，见图 7。



(a) 上翘现象 (b) 上翘过程

图 7 剪切盒上翘现象  
Fig.7 Shear box upturned phenomenon

该强风化片岩试样具有明显的原岩产状结构，倾角约 35°。由于含石率大，抗剪强度较高，因此，在剪切初期便有较高的剪切刚度；在剪切过程中上盘岩土体在剪应力作用下沿齿面向右上方滑动，背坡面前方局部区域被拉开，出现了空化现象，失去抗滑作用，使受力面积减小，剪应力和垂直应力全部转由滑移面承担，故正应力和剪应力均增大；在垂直应力和剪应力的共同作用下，上剪切盒由于爬坡效应而逐渐上翘。

设结构面起伏角为  $\theta$ ，齿面内摩擦角为  $\varphi_b$ ，并假设剪切滑动中滑面黏聚力  $C_b = 0$ ，爬坡效应过程的抗剪强度可由著名的佩顿公式表示<sup>[16]</sup>为

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_b + \theta) \quad (1)$$

佩顿公式指出，在较低的垂直应力作用下，起伏度的存在可以增大剪切面的摩擦角，即摩擦角由  $\varphi_b$  增大到  $\varphi_b + \theta$ ，引起剪胀，使抗剪强度增大。该强风化试样起伏度高达 13.6 cm，抗剪强度必然较大。

3.3 抗剪强度特性

强度准则是为研究岩土体破坏而提出的一种判定标准，其实质是本构关系曲线上的一个破坏点。目前岩土抗剪强度多用 Mohr-Coulomb 破坏准则确定，见式 (2)。该准则为线性准则，形式简单，参

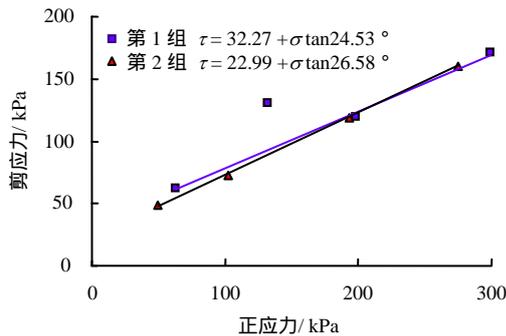
数可通过剪应力和正应力拟合得到。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

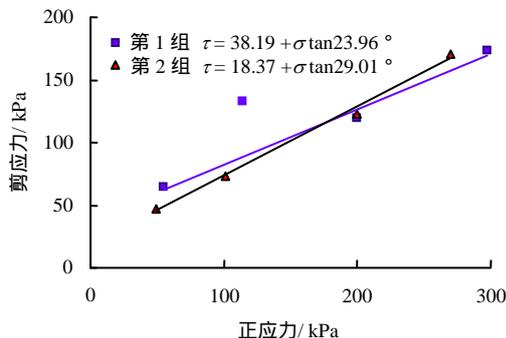
根据文献[17],对于没有明显峰值的应力-应变曲线,可取剪切位移为试样尺寸的 1/10(即 50 mm)时的应力值为抗剪强度。文献[18]规定,对于粗粒土直剪试验,取剪切位移达到试样直径的 1/15 ~ 1/10 对应的抗剪强度值。考虑到试样应力-应变曲线的差异性,本文分别取剪切位移为 40、50 mm 时的正应力和剪应力来拟合抗剪强度值,拟合结果见图 8,抗剪强度结果见表 2。

表 2 抗剪强度拟合结果汇总表  
Table 2 Summary of shear strength

位移值 / mm	组别	c / kPa	$\varphi$ / (°)
40	第 1 组	32.27	24.53
	第 2 组	22.99	26.58
50	第 1 组	38.19	23.96
	第 2 组	18.37	29.01



(a) 剪切位移为 40 mm 拟合结果



(b) 剪切位移为 50 mm 拟合结果

图 8 直剪试验数据拟合结果

Fig.8 Fitting results of direct shear test data

第 1 组试样 2 风化程度较其他试样弱,其正应力、剪应力均较大。舍去该特殊点进行强度拟合,结果显示,具有明显应变硬化特征的第 2 组试样拟合得到的黏聚力有所降低,内摩擦角稍有增大,但

两组差别不大。

两组试样拟合结果显示,该风化片岩残积土黏聚力  $c$  约为 20 ~ 35 kPa,内摩擦角  $\varphi$  约为 24° ~ 27°。文献[19]中通过原位试验给出的云南某高边坡强风化云母石英片岩的  $c, \varphi$  值见表 3。

表 3 云南某高边坡云母石英片岩的  $c, \varphi$  值  
Table 3 Shear strength of Mica-quartz schist of a high slope in Yunnan province

岩体	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)
上部岩	64.4	25.75
破碎岩	49.2	32.87
下部岩	121.0 ~ 131.0	41.00 ~ 58.00

由表可知,风化云母片岩剪切强度随岩体风化程度自上而下减弱而逐渐增大。这些试验结果均可作为边坡、隧道等工程的开挖支护、稳定性计算提供参考。

### 4 含石率、剪压应力比变化规律初探

#### 4.1 含石率 $k$ 与剪切起伏度的关系

目前直剪试验<sup>[2-3]</sup>多研究不同土、石含量对抗剪强度参数的影响关系,这对于室内重塑土或土石混合料研究较为方便。风化片岩束状排列的结构性、石块受剪易断裂的破碎性以及土石颜色的相似性,使得即便采用先进的图像识别技术,含石率也难以准确测定。

为了初步研究含石率及其结构性对剪切面起伏度的影响,绘制出束状孤石和束状石组的轮廓线并计算其投影面积,见图 4,含石率通过轮廓线所包围面积与剪切总面积的比值  $k$  得到。公式为

$$k = A_s / A \quad (3)$$

式中:  $A_s$  为束状石总面积;  $A$  为剪切面总面积,  $A = 2\ 500\ \text{cm}^2$ ;  $0 < k < 1$ 。 $k$  值计算结果汇总于表 4。

表 4  $k$  值计算结果汇总表  
Table 4 Summary of values of  $k$

组别	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4
第 1 组	0.59	0.97	0.12	0.25
第 2 组	0.48	0.65	0.45	0.40

剪切面起伏度主要是由土内束状孤石和束状石组引起的,为探求含石率与起伏度之间的关系,将含石率  $k$  与起伏度数据绘于图 9。两组试样数据拟

合结果显示，起伏度随含石率  $k$  的增大而增大，近似呈线性关系。

### 4.2 剪压应力比的变化规律

为研究剪切过程中剪应力与垂直应力的变化，定义剪压应力比  $\mu$  为剪力与垂直应力的比值， $\mu$  也是抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  的函数，为

$$\mu = \mu(c, \varphi) = (\tau A) / (\sigma A) = \tau / \sigma \quad (4)$$

根据式 (4) 将剪切位移为 40 mm 时剪压应力比  $\mu$  汇总于表 5。

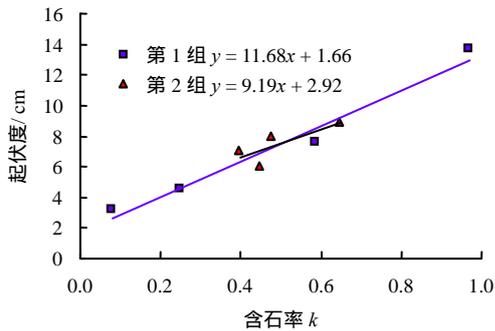


图 9 含石率  $k$  与起伏度拟合结果

Fig.9 Fitting results of stone ratio and waviness

表 5  $\mu$  值计算结果汇总表  
Table 5 Summary of values of  $\mu$

组别	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4
第 1 组	0.992	0.988	0.602	0.571
第 2 组	0.979	0.714	0.616	0.586

由表 5 可见，两组试样的剪压应力比  $\mu$  呈由大到小变化。

根据式 (1) (4) 得

$$\mu = \tau / \sigma = \tan(\varphi_b + \theta) \quad (5)$$

在垂直应力较小的情况下，剪切面多沿结构面滑动，剪切面起伏角  $\theta$  较大，剪压应力比  $\mu$  较大；随着垂直应力的增大，剪切面凸起逐渐被剪断（啃断），起伏角变小，剪胀作用逐渐变小，剪压应力比逐渐减小。可见随着垂直应力的增大，剪切破坏机制逐渐由滑移破坏变为啃断破坏，剪压应力比在逐渐减小。

## 5 结 论

(1) 该风化片岩残积土应力-应变曲线多呈应变硬化特征，无明显峰值。

(2) 组成试样的 3 种成分在剪切过程中呈现不同的破坏形态，土主要为平面的剪切破坏，束状孤

石多为翻滚破坏，束状石组多为啃断破坏。

(3) 剪切面起伏度随束状石的含石率增大而增大，二者近似呈线性关系。

(4) 剪切过程中，爬坡效应会引起剪胀，使剪应力和正应力均增大。

(5) 随着垂直应力的增大，剪切破坏机制逐渐由滑移破坏变为啃断破坏，剪压应力比逐渐减小。

## 参 考 文 献

[1] 沈珠江. 原状取土还是原位测试—土质参数测试技术发展方向的讨论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 94 - 95.

[2] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48 - 51.

WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behavior of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 48 - 51.

[3] 冯俊德, 李建国, 汪稔, 等. 云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3205 - 3210.

FENG Jun-de, LI Jian-guo, WANG Ren, et al. Large scale direct shear test on strength behavior of railway moraine soils in Yunnan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3205 - 3210.

[4] 谭捍华, 孟庆山. 千枚岩残坡积土大型直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 360 - 363.

TAN Han-hua, MENG Qin-shan. Experimental study of large scale direct shear test of phyllite residual soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 360 - 363.

[5] ROGGENSACK W D. Large scale laboratory direct shear tests on ice[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1975, 12(2): 169 - 178.

[6] LIU C, HO Y, HUANG J. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2009, 27(1): 19 - 30.

[7] ZEKOS D, ATHANASOPOULOS G A, BRAY J D, et al. Large-scale direct shear testing of municipal solid waste[J]. **Waste Management**, 2010, 30(8 - 9): 1544 - 1555.

[8] XU WEN-JIE, XU QIANG, HU RUI-LIN. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(8): 1235 - 1247.

[9] 张玉成, 杨光华, 苏卜坤, 等. 土质边坡土体抗剪强度室内外试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),

- 2007, 22(3): 45 - 49.
- ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, SU Bu-kun, et al. Laboratory and field testing study on shear strength of soil slopes[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)**, 2007, 22(3): 45 - 49.
- [10] 董云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27(2): 235 - 238.
- DONG Yun, CHAI He-jun, YANG Hui-li. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(2): 235 - 238.
- [11] 彭月英. 现场直剪试验在矿山边坡勘查中的应用[J]. **矿业快报**, 2007, (1): 35 - 38.
- PENG Yue-ying. Application of in-situ direct shear test in mine slope exploration[J]. **Express Information of Mining Industry**, 2007, (1): 35 - 38.
- [12] 刘斯宏, 肖贡元, 杨建州, 等. 宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(6): 772 - 776.
- LIU Si-hong, XIAO Gong-yuan, YANG Jian-zhou, et al. New direct shear tests on rockfill materials at Yixing pumped storage power station project[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 772 - 776.
- [13] 刘胜利, 陈善雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(12): 3616 - 3623.
- LIU Sheng-li, CHEN Shan-xiong, YU fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3616 - 3623.
- [14] 闵弘, 刘小丽, 魏进兵, 等. 现场室内两用大型直剪仪研制(I): 结构设计[J]. **岩土力学**, 2006, 27(1): 168 - 172.
- MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(I): Configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 164 - 168.
- [15] 刘小丽, 罗锦添, 闵弘, 等. 大型现场室内两用直剪仪研制(II): 试验测试[J]. **岩土力学**, 2006, 27(2): 336 - 340.
- LIU Xiao-li, LAW K T, MIN Hong, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(II): Proof-testing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 336 - 340.
- [16] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- [17] 中华人民共和国建设部. GB 50021 - 2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [18] 交通部公路科学研究院. JTG-E40 - 2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [19] 杨帆, 侯克鹏, 谢永利. 强风化云母石英片岩力学参数确定方法[J]. **长安大学学报(自然科学版)**, 2012, 32(2): 29 - 33.
- YANG Fan, HOU Ke-peng, XIE Yong-li. Mechanical parameters determination method for strongly weathered mica-quartz schist[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2012, 32(2): 29 - 33.

#### 上接第 3499 页

- YI Cheng, WANG Chang-jun, ZHANG Liang, et al. Study of description index system of rough surface based on bi-body interaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2481 - 2492.
- [19] 冯夏庭, MASAYUKI K, 王永嘉. 岩石节理力学参数的非线性估计[J]. **岩土工程学报**, 1999, 21(3): 268 - 272.
- FENG Xia-ting, MASAYUKI K, WANG Yong-jia. Nonlinear estimation of rock joint mechanical parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 268 - 272.
- [20] SUBBA R K, ALLAM M, ROBINSON R G. Interfacial friction between sands and solid surface interfaces[J]. **Geotechnical Engineering, Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, 1998, 31(2): 75 - 82.
- [21] HAMMOUD F, BOUMEKIK A. Experimental study of the behaviour of interfacial shearing between cohesive soils and solid materials at large displacement[J]. **Asian Journal of Civil Engineering**, 2006, 7(1): 63 - 80.
- [22] 周宏伟, 谢和平, KWASNIEWSKI M A, 等. 岩体节理表面形貌的各向异性研究[J]. **地质力学学报**, 2001, 7(2): 123 - 129.
- ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, KWASNIEWSKI M A, et al. On anisotropy of surface topography of rock joint[J]. **Journal of Geomechanics**, 2001, 7(2): 123 - 129.
- [23] 陈庆虎, 李柱. 表面粗糙度提取的小波频谱法[J]. **机械工程学报**, 1999, 35(3): 41 - 43.
- CHEN Qing-hu, LI Zhu. Method of wavelet for picking up surface roughness[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 1999, 35(3): 41 - 43.