

文章编号: 1000-7598(2012)11-3299-07

# 高压力下层间错动带残余强度特性和 颗粒破碎试验研究

赵 阳<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 邵建富<sup>1,3</sup>, 江 权<sup>1</sup>,  
卢景景<sup>1</sup>, 江亚丽<sup>4</sup>, 黄 可<sup>4</sup>

(1. 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试验室, 武汉 430071; 2. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011;  
3. 法国里尔科技大学 里尔力学试验室, 法国, 里尔 59655; 4. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

**摘 要:** 针对某水电站层间错动带的原状样与重塑样, 模拟现场地应力条件, 在试验法向应力高达 10 MPa 条件下开展了反复直剪试验。试验结果表明: 原状样峰值强度高于重塑样, 但强度下降较快, 二者残余强度趋于一致; 此外, 试样发生了大规模的颗粒破碎, 采用颗粒相对破碎势  $B_r$  量化重塑样剪切面附近区域与非剪切面附近区域颗粒破碎程度, 对比发现, 前者颗粒破碎程度高于后者, 且破碎机制不同; 剪切面颗粒破碎是高压下残余强度包线非线性的根本原因; 剪切强度的下降(残余强度与峰值强度的比值)与  $B_r$  和  $S_2$  (试验前后小于粒径  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量的比值)呈线性关系, 颗粒破碎导致的能量释放和不断产生的黏粒 ( $< 2 \mu\text{m}$ ) 降低了剪切强度。

**关 键 词:** 层间错动带; 反复直剪; 残余强度; 高压; 颗粒破碎

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

## Residual shear behaviour and particle crushing of an infilled joint soil under high stress

ZHAO Yang<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>, SHAO Jian-fu<sup>1,3</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>,  
LU Jing-jing<sup>1</sup>, JIANG Ya-li<sup>4</sup>, HUANG Ke<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. Laboratory of Mechanics of LILLE, Polytechnique of Lille, Lille 59655, France;  
4. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Multi-reversal direct shear test is conducted on the undisturbed and remolded infilled joint soils under in-situ stress where normal stress is as far as 10 MPa for test from a hydropower station. It is revealed that the peak shear strength is higher but decreases more rapidly for the undisturbed samples compared with the remolded ones; however, it seems the residual shear strengths tend to be the same. In addition, a large amount of particle crushing occurs,  $B_r$  (relative particle crushing potential) is adopted to quantify the degree of particle crushing in the shear zone and the non-shear zone. The results show that the amount of particle crushing in the shear zone is larger than that in the non-shear zone; and the mechanisms of particle crushing are different for the two zones. Furthermore, particle crushing is considered as the main reason for the nonlinear relationship of the residual shear strength under high pressure; the decrease of shear strength (ratio of the residual shear strength to the peak shear strength) is linear with  $B_r$  and  $S_2$  (the ratio of clay fraction before test to the one after test for the shear zone). It is indicated that the energy liberation and continuously generated clay fraction caused by particle crushing decrease the shear strength.

**Key words:** infilled joint soil; multi-reversal direct shear; residual shear strength; high pressure; particle crushing

## 1 引 言

层间错动带(泥化夹层)是软弱岩体在构造运

动过程中发生破碎、错动形成破碎夹层,并在地下水及风化作用下软弱甚至泥化而形成的,常在水电工程建设中遇到(如葛洲坝,小浪底,白鹤滩)。由

收稿日期: 2011-09-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2010CB732006); 国家自然科学基金(No. 50979104); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX2-EW-QN115)。

第一作者简介: 赵阳, 男, 1985年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学试验研究与数值模拟。E-mail: china.zhaoyang@hotmail.com

通讯作者: 周辉, 男, 1972年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土力学与工程方面的研究。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

于与母岩相比层间错动带具有较低的力学特性,被认为是工程中最薄弱的环节,并对整体工程的稳定性起决定性作用。根据大量工程实例<sup>[1-3]</sup>,层间错动带具有以下特性:①一般孔隙比较小(<0.6),往往由于其揭露处较深,上覆岩体较厚;②天然含水率较低,在天然情况下已接近固态或者半固态;③抗剪强度已接近或者达到残余强度,由于在地质历史时期经过较大挤压和剪切错动,剪切面上的颗粒已不同程度地定向排列。

Skempton<sup>[4]</sup>认为,残余强度是试样在排水条件下经过较大位移所达到的最小剪切应力值。残余强度与试样的矿物成分<sup>[5-6]</sup>(如 Atterberg 界限)、颗粒组成<sup>[5-7]</sup>、法向应力大小<sup>[8]</sup>、剪切速率<sup>[9]</sup>以及孔隙水的化学成分<sup>[10]</sup>等因素有关。但如前所述,层间错动带往往赋存于岩体较深处,其在天然状态下处于现场地应力(高压)环境中,而目前残余强度试验成果多集中在较低法向应力(0~2 MPa)<sup>[2,11]</sup>,但深埋土在高压下(一般认为,试验应力大于 1 MPa)的力学性质与常规土力学试验得到的参数有着不可忽略的差别<sup>[12]</sup>。

颗粒破碎是高压下影响土体力学特性的重要因素,众多国内外学者认为,颗粒破碎往往导致土体强度的降低:颗粒的大小、形状、粗糙度对于土体的定向排列和剪切强度有着重要的影响。层间错动带是岩石向土转化的中间产物,颗粒并未完全泥化(风化),岩屑(岩片)不均匀夹杂在已发育的泥化带中,结构性较强,颗粒不均匀。颗粒形态一般棱角尖锐,粗糙且呈不规则形状。Kjaernsli 和 Sande<sup>[13]</sup>发现,在给定的应力下,不规则且表面粗糙的颗粒更容易发生破碎。因此,层间错动带可能在破坏滑动时发生大规模的颗粒破碎。目前,颗粒破碎的研究集中在钙质砂、堆石料等材料<sup>[14-15]</sup>,有关层间错动带在高压剪切作用下的颗粒破碎研究开展甚少。

本文针对某水电站揭露的层间错动带在现场地应力(试验法向应力高达 10 MPa)条件下开展了反复直剪试验,对比了原状样与重塑样的力学性质差异,并结合试验后的粒径分析试验,探讨了残余强度非线性的机制,分析了颗粒破碎对残余强度的影响。

## 2 试样制备与试验方法

### 2.1 试样制备与工程特性

此次试验所需试样取自某水电站水平探洞中,由凝灰岩发育而成,上覆玄武岩岩体最厚处约 340 m。根据以往采样的经验<sup>[16]</sup>,发现在洞壁出露的层间错动带往往位于探洞的松动圈内并长时间吸附空气中的水分,导致测得的天然密度和含水率偏

大。此次选定此探洞内距洞口 15、27、35 m 共 3 处作为采样位置(分别为取样点 1、2、3),现场测量含水率与密度和采样方法详见文献<sup>[16]</sup>。为了减小对试样的扰动,人工用凿子和铁锤凿去层间错动带上方的凝灰岩,并每隔 5 cm 挖去洞壁出露的层间错动带进行密度与含水率的测定,挖去的土样收集装入塑料袋用作重塑土样。经过测定,在距离洞壁 40 cm 左右试样的密度与含水率(见表 1)会趋于一致。因此,选择在距洞壁 40 cm 处小心地用切刀把软弱夹层削切成 15 cm×15 cm×8 cm 的原状试样,并用塑料布密封裹紧,装入样品盒内,样品盒同样用塑料布包裹密封以防止水分蒸发。在 3 处取样位置共取得原状试样 8 个。室内试验针对 3 个取样地点的土样补充了液塑限和土粒相对密度试验,试验结果见表 1。颗粒级配分析试验见图 1。此外,选取 3 个采样地点的样品(母岩和泥化夹层)开展了 X 射线衍射分析试验以探明其矿物成分,试验结果见表 2。

表 1 层间错动带物理性质试验结果

| 取样位置  | 天然含水率<br>/% | 密度 $\rho_s$<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 土粒相对密度<br>$G_s$ | 液限<br>$w_L$ /% | 塑性指数<br>$I_p$ |
|-------|-------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
| 取样点 1 | 8.2         | 2.36                                 | 2.87            | 24.9           | 9.1           |
| 取样点 2 | 6.3         | 2.30                                 | 3.01            | 23.8           | 11.5          |
| 取样点 3 | 6.8         | 2.21                                 | 2.94            | 21.1           | 9.7           |

从表 1 可以看出,层间错动带的天然含水率较低(均值为 7.1%),计算平均孔隙比为 0.44,试样较为密实;土粒相对密度较大(均值为 2.94),且塑性指数较小(均值为 10.1),在天然情况下含水率已低于塑限处于半固态。从表 2 可以看出,层间错动带的矿物成分和母岩极为接近,说明层间错动带是由母岩转化而来,但黏土矿物成分有所增加(平均增加 13%);赤铁矿(平均含量为 33%)是造成其土粒相对密度偏高的原因。

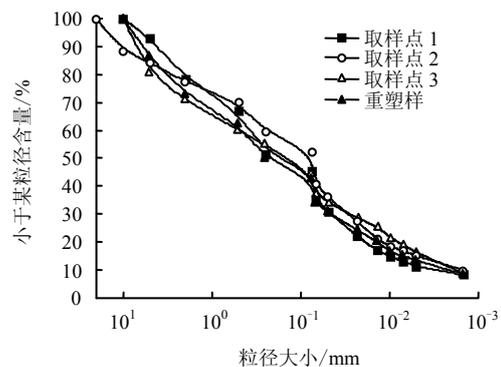


图 1 原状样与重塑样颗粒粒径分布曲线  
Fig.1 Particle size distributions of undisturbed and remolded samples

**表 2 层间错动带 X 射线衍射试验结果**  
**Table 2 Mineralogical compositions from the X-ray diffraction tests**

| 取样点号  | 样品    | 各组分含量 |       |        |
|-------|-------|-------|-------|--------|
|       |       | 楣石/%  | 赤铁矿/% | 黏土矿物/% |
| 取样点 1 | 母岩    | 26    | 39    | 35     |
|       | 层间错动带 | 20    | 37    | 43     |
| 取样点 2 | 母岩    | 32    | 38    | 30     |
|       | 层间错动带 | 20    | 30    | 50     |
| 取样点 3 | 母岩    | 24    | 35    | 41     |
|       | 层间错动带 | 16    | 32    | 52     |

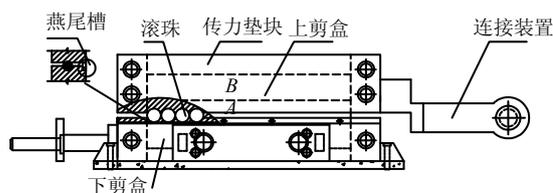
注：黏土矿物主要为伊利石。

由图 1 可见，尽管 3 处采样地点仅隔数十米，但现场泥化夹层粒径分布并不均匀：取样点 1 的不均匀系数  $C_u=121.33$ ，曲率系数  $C_c=1.85$ ，限制粒径  $d_{60}=0.364\text{ mm}$ ；取样点 2 的  $C_u=174.13$ ， $C_c=2.148$ ， $d_{60}=0.361\text{ mm}$ ；取样点 3 的  $C_u=247.5$ ， $C_c=0.79$ ， $d_{60}=0.495\text{ mm}$ 。取样点 1、3 的最大粒径为 1 cm，取样点 2 的最大粒径为 2 cm。但根据肖树芳和阿基诺夫<sup>[17]</sup>对泥化夹层的分类，这 3 处取到的层间错动带试样同属于泥夹碎屑层。

重塑样的制备是首先把 3 个采样地点的土样混合均匀并在室外风干，团聚体用木槌敲散。然后过 10 mm 筛，把混合风干后的土样加入定量的蒸馏水搅拌均匀，以达到天然含水率 7.1%，并装入密封塑料袋搁置在恒温 22 °C 的房间中 24 h 以上。最后，根据天然孔隙比为 0.44，试验时将定量的土样装入剪切盒中，分 3 层刨毛并捣筑密实。重塑样的颗粒级配分析试验结果见图 1。室内试验测得其  $G_s=2.94$ ， $w_L=22\%$ ， $I_p=10.1$ 。

**2.2 试验仪器**

试验设备采用中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的应变式大型室内及现场两用直剪装置。该仪器的结构、水平与垂直加载系统、量测系统等细节可参考文献[18]。为了达到现场地应力水平（自重应力 9 MPa 左右），对剪切盒的尺寸进行了改造（见图 2），其净空几何尺寸为 120 mm×100 mm × 80 mm（长×宽×高），在剪切盒内边缘使用了燕尾槽结构防止土样在高压下侧向挤出。仅改变其尺寸大小可以保证剪切盒与原加载系统的相对位置不变，可以充分利用原有结构的可靠性和优越性，原最大设计法向压力为 200 kN，改变剪切面积后法向应力理论最高可提高至 16 MPa。由于测得的法向应力范围 0~16 MPa 比原结构要大很多，原垂直压力传感器不再适用，此次试验法向压力数据直接由千斤顶的压力百分表读得。在试验过程中，水平位移、垂直位移和水平剪力可以自动采集并记录。



**图 2 高压直剪剪切盒示意图**  
**Fig.2 Schematic of the shear box under high normal stress**

**2.3 试验内容**

针对原状样共进行了法向应力为 2、4、6、8、10 MPa 共 5 级应力下的固结排水反复剪切试验。每级应力做 1 个平行试验。固结标准为 0.002 mm/min。每个试样循环推剪 4 次，推剪速率为 0.216 mm/min，剪切盒拉回时速率为 0.6 mm/min，推剪单程位移为 15 mm，累计位移共 60 mm。重样试样仍采用上述试验方案，但每级应力仅用 1 个试样。试验结束后，将上剪切盒中的试样取出，由于下剪切盒中的试样不易取出，仅凿取下剪切盒试样表层土样（约 1 cm 厚）做含水率分析。测试表明，各试样的含水率差异很小（见表 3）。此外，上剪切盒中的试样分为两个区域（见图 2）：A 区域（剪切面附近约 2 cm 厚）和 B 区域（A 区域上至试样顶面）做颗粒粒径分析。但如前所述，由于层间错动带天然状态下粒径分布不均匀，试验前的粒径分析结果（见图 1）未必可以代表每一个原状样的颗粒大小分布，因此，仅对试验后重塑试样做颗粒粒径分析。

**3 试验结果与讨论**

**3.1 反复直剪试验**

在各级法向应力（2~10 MPa）下，试样的剪应力-位移曲线表现出了相同的趋势，典型的剪应力-位移试验曲线如图 3 所示，图中是原状样和重塑样在法向应力为 8 MPa 下的试验曲线。从图中可以看出，原状样与重塑样在各次剪切过程中的剪应力-位移曲线均没有明显的峰值强度，曲线形式类似于理想塑性模型曲线。另外，在反复剪切过程中，原状样与重塑样的强度均会随着剪切次数的增多而降低，可以看出，第 4 次剪切强度与第 3 次相差不多，在第 4 次剪切时已达到残余状态。但原状样第 1 次剪切后的强度 4.95 MPa 略高于重塑样的强度 4.76 MPa，原状样第 2 次剪切强度的降幅为 26.9%，高于重塑样的 19.1%，且第 2 次剪切强度低于重塑样；原状样与重塑样第 3 次剪切强度相比差别不大，在经过 4 次剪切后，二者残余强度几乎趋于一致（分别为 3.15、3.01 MPa）。

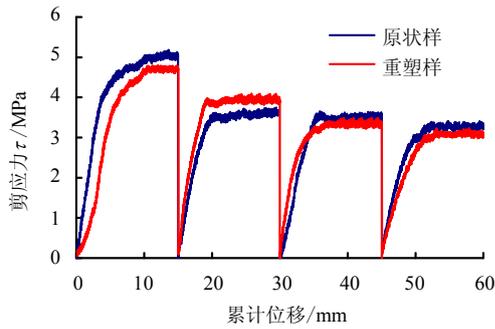


图3 典型的原状样与重塑样累计位移-剪应力曲线 (法向应力为 8 MPa)

Fig.3 Typical accumulated displacement-shear stress curves for undisturbed and remolded samples under normal stress of 8 MPa

根据试验结果,可以得到原状样与重塑样在不同剪切次数下的强度包线,如图4、5所示。从图4可以看出,原状样第1次剪切强度包线为直线(黏聚力  $c=463$  kPa, 摩擦角  $\varphi_p=30.23^\circ$ ),但随着剪切次数的增多,第2次至第4次强度包线有向下弯的趋势,呈明显的非线性。因此,在第1次剪切之后,强度指标由残余摩擦角  $\varphi_r$  表示,统计结果见表3。图5呈现出了与图4相同的趋势。可以得到,重塑样第1次剪切内摩擦角与原状样类似(分别为  $30.23^\circ$  和  $28.44^\circ$ ),但  $c$  值(195 kPa)降低了一半以上(为原状样 46%),在第2次剪切过程中,重塑样  $\varphi_r$  值高于原状样,但在多次剪切过程中  $\varphi_r$  值逐渐降低并趋于一致(见表3)。

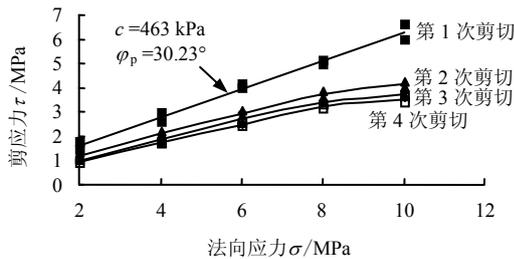


图4 原状样不同剪切次数下的强度包线

Fig.4 The strength curves of the undisturbed samples with different shear circles

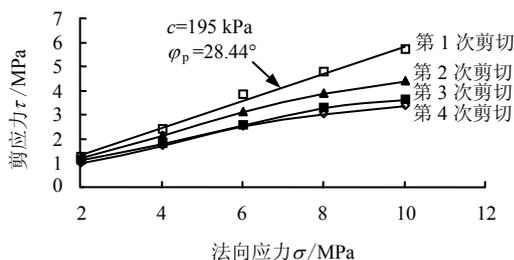


图5 重塑样不同剪切次数下的强度包线

Fig.5 The strength curves of the remolded samples with different shear circles

表3 反复直剪结果统计表

| Table 3 Results of the multi-reversal direct shear tests |         |                    |                              |       |       |
|--|---------|--------------------|------------------------------|-------|-------|
| 试样类别   | 含水率 w/% | 法向应力 $\sigma$ /MPa | $\varphi_r / (^\circ)^{(2)}$ |       |       |
|  |         |                    | 第2次剪切                        | 第3次剪切 | 第4次剪切 |
| 原状样 <sup>(1)</sup>                                       | 7.5     | 2                  | 30.24                        | 26.46 | 25.39 |
|  | 7.0     | 4                  | 28.16                        | 24.88 | 23.28 |
|  | 7.2     | 6                  | 26.15                        | 24.49 | 22.38 |
|  | 6.6     | 8                  | 25.04                        | 23.13 | 22.03 |
|  | 7.1     | 10                 | 22.55                        | 20.51 | 19.43 |
|  | 7.1     | 2                  | 30.66                        | 28.47 | 25.65 |
| 重塑样  | 7.0     | 4                  | 27.71                        | 23.94 | 22.79 |
|  | 7.1     | 6                  | 27.33                        | 22.88 | 21.23 |
|  | 6.8     | 8                  | 25.71                        | 22.12 | 20.63 |
|  | 6.9     | 10                 | 23.52                        | 19.81 | 18.63 |

注: (1) 原状样试验数据为两次试验平均值; (2)  $\varphi_r$  由  $\tan^{-1}$  (剪切强度/法向应力) 计算得到。

对比原状样与重塑样的破坏特征和破坏指标,可以得到以下认识:

(1)  $c$  值方面: 原状样在历史过程中沉淀、挤压后胶结较好,保留了较高的黏聚力,重塑试样无法复制天然状态下形成的胶结结构。但原状样胶结结构非常脆弱,一旦经历剪切后,胶结结构破坏,强度会迅速减低甚至低于重塑样。在实际工程中,层间错动带一旦发生错动,其抗剪强度可能会迅速减低并伴随大规模的相对滑动,工程支护设计时应严格限制泥化夹层带位移值。

(2) 残余强度(或  $\varphi_r$ ) 方面: 试样在经历反复剪切后,强度主要由  $\varphi_r$  提供:  $c$  由于上、下剪切面不连续性和扁平黏土颗粒高度定向排列而逐渐消失。由于原状试样已经存在某种程度上的颗粒定向排列,而重塑样本身并无结构性需要进行颗粒的重新排列(第2次剪切  $\varphi_r$  值高于原状样),这也是原状样强度要比重塑样强度下降快的原因。此外,  $\varphi_r$  值与试样的初始结构并不相关,重塑样的  $\varphi_r$  值可以替代原状样的  $\varphi_r$  值(见表3)。

层间错动带强度包线的一个重要特征是残余强度的非线性(见图4、5),较低法向应力下的  $\varphi_r$  值往往高于高法向应力下的  $\varphi_r$  值(见表3)。鉴于层间错动带颗粒较大(最大 1 cm)粗糙且棱角分明,易发生破碎,颗粒破碎可能是造成其残余强度非线性的原因。

### 3.2 颗粒粒径分析

图6、7分别为重塑样剪切面A区域和B区域(见图3)的颗粒粒径分析试验结果。为了便于比较,重塑样的原颗粒粒径分布曲线也绘制在图6、7上。

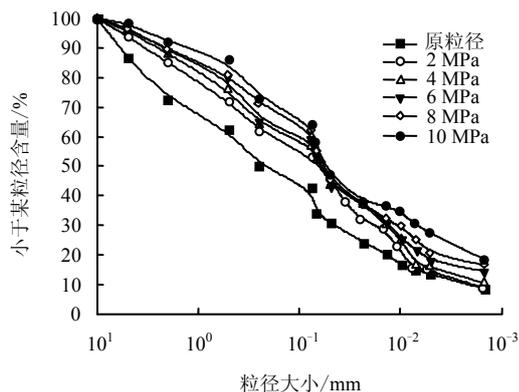


图 6 A 区域剪切面颗粒粒径分布曲线  
Fig.6 Particle distribution curves of the shear zones (zone A)

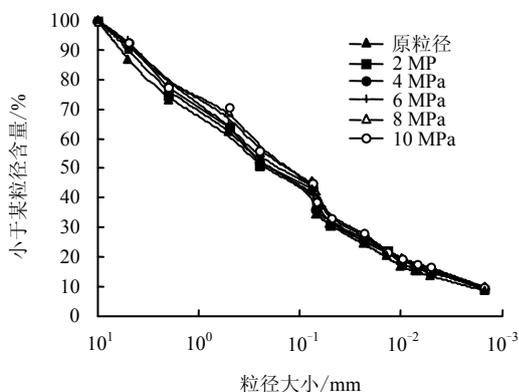


图 7 B 区域颗粒粒径分布曲线  
Fig.7 Particle distribution curves of zone B

从图 6 可以看出，剪切后 A 区域颗粒粒径分布曲线发生了明显的变化，曲线随着法向应力的增高而向上移动：颗粒破碎会随法向应力的升高而增大，10 MPa 法向应力下的曲线位于图中最上部，细颗粒明显增多；B 区域（见图 7）颗粒粒径分布曲线与原颗粒粒径分布相比并未发生较大的改变，尤其是 0.075 mm 以下细颗粒部分曲线几乎与原颗粒粒径分布相同；粒径较大 (>0.075 mm) 部分曲线段随着法向应力的增高有所上移，说明较大粒径发生了颗粒破碎，但破碎程度并不明显。为了量化颗粒破碎，本文采用 Hardin<sup>[19]</sup>提出的颗粒粒径破碎指标  $B_r$  量化其颗粒破碎程度。 $B_r$  定义为在横轴为  $\lg d$ ， $d$  为粒径，纵轴为超过某粒径百分比坐标系中，试验前、后颗粒粒径分布曲线和粒径为 0.074 mm 竖线所围面积与试验前颗粒粒径分布曲线与 0.074 mm 竖线所围面积的比值，计算结果见图 8。

可以看出，A 区域  $B_r$  随着法向应力的增高而线性增大，B 区域  $B_r$  较小 (<0.16) 且明显小于 A 区域，其随法向应力增高但增长比较缓慢。A、B 区域

颗粒破碎机制明显不同：根据 Guyon 和 Troadec<sup>[20]</sup>对颗粒破碎机制的划分，A 区域由于上、下剪切面的滑动，颗粒之间相互滑移碰撞超过颗粒本身拉应力，其破碎机制主要为磨损或磨损，更易产生细小颗粒；B 区域在高压作用下颗粒之间相互嵌入咬合，由于大颗粒微裂隙（缺陷）较多，易受压发生破碎，产生粒径相对较大的颗粒。剪切面附近（A 区域）颗粒粒径变化适用于对反复剪切导致的剪切（面）强度变化的分析。

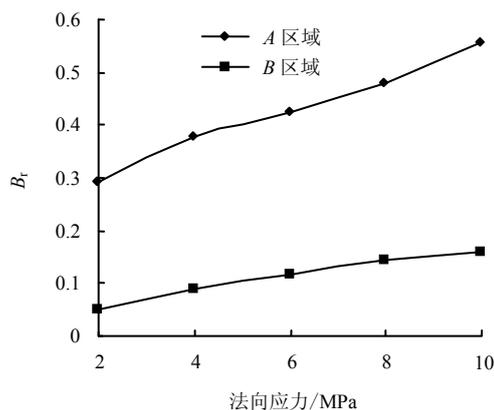


图 8 A、B 区域的颗粒破碎指标  $B_r$   
Fig.8  $B_r$  for the zone A and zone B

### 3.3 颗粒粒径对残余强度的影响

理论上讲，任意某一粒径在剪切前后所占的粒径比例都可以用来分析颗粒破碎<sup>[21]</sup>。除  $B_r$  外，还可采用参数  $S_2$  进一步分析颗粒粒径对残余强度的影响。 $S_2$  定义为剪切后与剪切前小于 2  $\mu\text{m}$  粒径比例的比值。图 9 描述了残余强度  $R$  与峰值强度（第 1 次剪切强度） $P$  的比值和  $B_r$ 、 $S_2$  的关系。

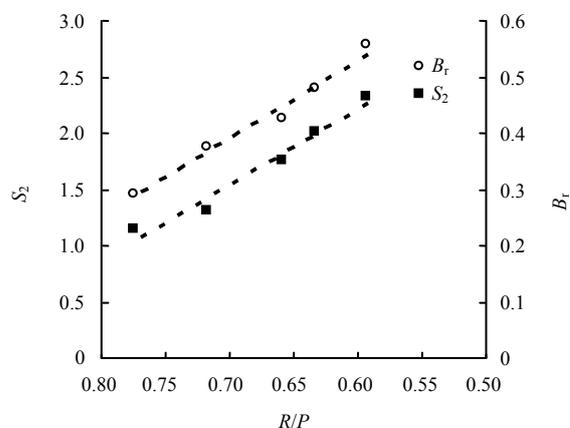


图 9  $R/P$  与  $B_r$  和  $S_2$  的线性关系  
Fig.9 The liner relationships between  $R/P$  and  $B_r$  &  $S_2$

可以看出， $R/P$  与  $B_r$ 、 $S_2$  几乎是线性关系，根据  $B_r$  与  $S_2$  的定义，颗粒破碎本身与破碎后黏粒含量

(< 2 μm)的增加均会对残余强度产生影响:

(1) 每次剪切过程都是土体抗剪强度不断增高直至不能承受剪应力(破坏)为止,这一过程也是能量累计的过程。当剪切力不断增高并反复剪切时会发生颗粒的磨耗或磨损并导致颗粒破碎,这一过程伴随着能量的释放,从而降低了土体抗剪能力。

(2) 残余强度与颗粒定向排列密切相关。Mesri和Cepeda-Diaz<sup>[22]</sup>对比不同黏粒含量(<2 μm)试样的剪切强度,发现黏粒含量的增多会降低剪切强度。在本次试验中,即使重塑试样初始粒径相同,颗粒破碎导致试样在试验中不断产生黏粒(<2 μm),从而增加了颗粒的定向排列,并由此降低了残余强度。

## 4 结 论

(1) 原状样与重塑样结构有明显差别:原状样在历史沉积、挤压作用下胶结程度高于重塑样,第1次剪切强度高于重塑样;但二者残余强度几乎相同,主要是由于原状样胶结结构较脆弱和其已经存在的某种程度上的颗粒定向排列。工程支护设计时应严格限制层间错动带位移值,以防止其错动后强度迅速降低而引发大规模的相对滑动。

(2) 试样剪切面附近区域与非剪切面附近区域颗粒破碎机制不同:剪切面附近区域颗粒破碎主要为磨耗或磨损产生了较小颗粒;非剪切面附近区域主要为颗粒破裂,产生相对较大颗粒。采用 $B_r$ 量化二者的颗粒破碎程度,剪切面附近区域颗粒破碎明显高于非剪切面附近区域。

(3) 残余强度包线具有明显的非线性,颗粒破碎被认为是其根本原因:随着法向应力的增大,一方面颗粒破碎导致能量释放加剧;另一方面试验中不断产生的黏粒(<2 μm)含量增多,增大了颗粒的定向排列程度并由此降低了剪切强度。

(4) 值得注意的是,本文仅针对层间错动带在天然状态下的原状样和根据现场物理性质指标重塑的试样进行了试验,但含水率、初始颗粒粒径分布、初始干密度等因素<sup>[16]</sup>均会对其力学性质产生影响,后续的研究会对这些因素深入分析和讨论。

**致谢:** 闵弘副研究员对试验仪器的改造及试验方案的内容给予了大力协助和宝贵的建议,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

[1] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰. 围压效应与软弱夹层泥化的可能性分析[J]. 地质评论, 1990, 30(2): 160—167.  
ZHANG Xian-gong, NIE De-xin, HAN Wen-feng. The effect of confining pressure and the possibility of

argillization of weak intercalations[J]. **Discussion of Geological**, 1990, 30(2): 160—167.

- [2] 徐国刚. 红色碎屑岩系中泥化夹层组构及强度特性研究[J]. 人民黄河, 1994, 10: 33—36.  
XU Guo-gang. Study of formation and strength features of clay gouged intercalation in red fragment rock series[J]. **Yellow River**, 1994, 10: 33—36.
- [3] 龚壁卫, 郭熙灵. 泥化夹层残余强度的非线性问题探讨[J]. 大坝观测与土工测试, 1997, 21(5): 38—40.  
GONG Bi-wei, GUO Xi-ling. Study of the nonlinearity of residual shear strength of mudded intercalation[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1997, 21(5): 38—40.
- [4] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes[J]. **Géotechnique**, 1964, 14(2): 75—102.
- [5] DE P K, FURDAS B. Discussion on Wallace[J]. **Géotechnique**, 1973, 23(4): 601—603.
- [6] DEWOOLKAR M M, HUZJAK R J. Drained residual shear strength of some claystones from Front Range, Colorado[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(12): 1543—1551.
- [7] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley, 1976.
- [8] STARK T D, EID H T. Drained residual strength of cohesive soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, 120(5): 856—871.
- [9] TIKA T E, VAUGHAN P R, LEMOS L. Fast shearing of pre-existing shear zones in soil[J]. **Géotechnique**, 1996, 46(2): 197—233.
- [10] KENNEY T C. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils[C]//Proceedings of Geotechnical Conference on the Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks. Oslo, Norway: [s. n.], 1967: 123—129.
- [11] 闫汝华, 樊卫花. 马家岩水库坝基软弱夹层剪切特性的及强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3761—3764.  
YAN Ru-hua, FAN Wei-hua. Shear properties and strength of weak intercalated layers in dam foundation of Majiayan reservoir[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3761—3764.
- [12] 马金荣. 深层土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1999.
- [13] KJAERNSLI B, SANDE A. Compressibility of some

- coarse grained materials[C]//Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden: Germany, 1963: 245—251.
- [14] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237—1246.  
GAO Yu-feng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study of particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1237—1246.
- [15] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043—2048.  
ZHANG Jia-ming, JIANG Guo-sheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2043—2048.
- [16] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 地应力作用下软弱层带的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 584—587.  
FU Wen-xi, NIE De-xin, SHANG Yue-quan, et al. Study of engineering properties of weak layers under ground stresses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 584—587.
- [17] 肖树芳, K.阿基诺夫. 泥化夹层的组构及强度蠕变特性[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- [18] 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, 26(1): 168—172.  
MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bin, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(I): configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 26(1): 168—172.
- [19] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111(10): 1177—1192.
- [20] GUYON E, TROADEC JP DU. Sac de billes au tas de sable[M]. Paris: Odile Jacob Sciences, 1994.
- [21] LADE P V, YAMAMURO J A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1996, 122(4): 309—316.
- [22] MESRI G, CEPEDA-DIAZ A F. Residual shear strength of clays and shales[J]. **Géotechnique**, 1986, 36(2): 269—274.

## 第 4 届全国岩土与工程学术大会 第 1 号通知

(2013 年 11 月上旬, 杭州)

**会议主题:** 岩土与工程技术的可持续发展

**主办单位:** 中国岩石力学与工程学会, 中国建筑学会工程勘察分会,  
中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国地质学会工程地质专业委员会。

**承办单位:** 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江大学建筑工程学院, 浙江省交通规划设计研究院,  
杭州图强工程材料有限公司, 浙江省岩土力学与工程学会, 《岩石力学与工程学报》编辑部。

**时间地点:** 2013 年 11 月上旬 浙江杭州。

**主要议题:** 岩土的基本性质与本构关系; 岩土工程数值分析与仿真; 边坡、基坑与地下工程典型案例; 岩土力学实验研究方法; 软土地基处理的新概念、新技术、新工艺; 复杂地质条件下施工安全和工程稳定问题; 岩土工程的加固与防护新理念、新方法、新技术; 重大地质灾害形成机理预警与防治; 环境友好的岩土工程技术; 岩土文物的勘察与保护技术; 岩土与工程技术应用的新领域; 岩土工程风险评价与管理; 其他。

**会议论文征集:** 论文题目由论文撰写者根据大会主题和专题自由选定。会议论文应为未经发表过的最新成果。学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查, 精选 100~150 篇论文在《岩石力学与工程学报》(正刊及增刊)和《岩土力学》期刊上正式发表, 其余通过评审的论文将以论文集的形式公开出版。论文格式请严格按照《岩石力学与工程学报》投稿要求编排(登陆网站: <http://www.rockmech.org>, 点击“投稿须知”一栏, 下载论文模板)。论文字数请控制在 6 页以内。来稿请注明作者详细通讯地址、E-mail 及联系电话。

**重要日期:** 2013 年 4 月 30 日论文全文提交截止;

2013 年 6 月 15 日论文审稿意见通知;

2013 年 7 月 10 日提交正式论文。

**秘书处:** 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院科技信息部 联系人 程平 陈晓芬 周才全

**通讯地址:** 杭州市潮王路 22 号 邮编 310014 传真 0571-88070004

**会议论文提交 E-mail:** shy@zju.edu.cn ytlx2013@sohu.com 联系人 孙红月 13666657809 0571-8820 8732