

文章编号: 1000-7598 (2013) 02-0365-07

# 高压力下原状层间错动带三轴不排水 剪切特性及其影响因素分析

赵 阳<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 崔玉军<sup>1,3</sup>, 江 权<sup>1</sup>,  
高 红<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实验室, 武汉 430071; 2. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011;  
3.法国路桥大学, 法国 巴黎 77455; 4.中国水电顾问集团华东勘察设计研究院, 杭州 310014)

**摘 要:** 针对某大型水电站揭露的原状层间错动带试样, 模拟现场快速施工可能会产生的不排水边界条件, 在围压 5~30 MPa 的高压力条件下开展了不固结不排水三轴试验, 并结合试样物理性质的差异, 分析讨论了原状层间错动带的力学特性。试样试验曲线和破坏模式主要由高围压控制: 其应力-应变关系曲线均为应变硬化型且破坏后呈腰鼓状为塑性破坏。此外, 较湿颗粒发生了大规模的颗粒破碎, 其是造成高饱和度试样强度包线的趋势线随围压降低的根本原因。试验结果明显受物理性质影响造成了试验数据离散性, 敏感性分析表明, 围压  $P$  和饱和度  $S_r$  对初始弹性模量  $E_0$  和破坏强度  $\sigma_s$  的影响最大, 其次是孔隙比  $e$ , 颗粒粒径 ( $d_{60}$ ) 分布对其影响程度最小。根据试样剪切特性建立的强度特征 ( $E_0$  和  $\sigma_s$ ) 初步预测公式可供实际工程参考。

**关 键 词:** 层间错动带; 原状样; 高压; 颗粒破碎; 离散性

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

## Undrained shear behaviour of intact infilled joint soil with triaxial shear tests under high pressure and its influence factor analysis

ZHAO Yang<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>, CUI Yu-jun<sup>1,3</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>,  
GAO Hong<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. Ecole des Ponts ParisTech, Navier/CERMES, Paris 77455, France; 4. Hydro China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The unconsolidated and undrained triaxial test is carried out on the intact infilled joint soils exposed at some major hydropower station under high pressure whose confining pressure is between 5 and 30 MPa to simulate the undrained boundary condition generated by rapid construction in-situ, and the mechanical behaviour of the infilled joint soils is discussed with the variation of physical property for each sample. The experiment results and failure mode are mainly controlled by high confining pressure: all the stress-stain relationships belong to strain hardening type, besides the samples after failure are presented as waist drum, and plastic failure occurs. Moreover, a large amount of particle crushing occurs among the wet particles, it is considered as the prime reason for the trend line of strength envelope decreasing with the increased confining pressure. The test data show discreteness for the effect of variation of physical property, and the sensitivity analysis (partial correction coefficient) indicates that: confining pressure  $p$  and saturation degree  $S_r$  have a major effect on the initial elastic modulus and failure stress  $\sigma_s$ ; the void ratio  $e$  and the particle size distribution ( $d_{60}$ ) have the minimal effect. In addition, the equation proposed according to the shear behaviour can be used to estimate the strength features ( $E_0$  and  $\sigma_s$ ) of the infilled joint soils preliminarily in practice.

**Key words:** infilled joint soil; intact samples; high pressure; particle crushing; discreteness

收稿日期: 2011-11-10

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); 中国科学院与国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划 (No. KZCX2-YW-T12)。

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与数值模拟的研究工作。E-mail: china.zhaoyang@hotmail.com

通讯作者简介: 周辉, 男, 1972 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: hzhuo@whrsm.ac.cn

## 1 引言

层间错动带的力学性质受赋存环境的控制,尤其是地应力水平会显著的影响其工程特性<sup>[1]</sup>。在如二滩、拉西瓦、白鹤滩等一些重大的水电工程中,地应力量值已达到相当高的程度,夹杂在上下岩体中的层间错动带同样承受了较高的应力状态。在实际工程中,如果现场施工进度较快,高加卸荷速率可能会产生不排水边界条件。在试验室测试中,有必要模拟现场地应力条件开展不排水三轴试验研究其力学性质。

国内外众多学者<sup>[2-4]</sup>已针对不同材料(如河砂、钙质砂,堆石体等)开展了围压最高约 70 MPa 的三轴不排水试验,但层间错动带有其自身的特性:

(1)层间错动带是岩石向土转化的中间产物,颗粒粒径分布(PSD)极不均匀。尽管肖树芳等<sup>[5]</sup>和王行本<sup>[6]</sup>已根据 PSD 对其进行了分类,但根据现场采样经验,不仅不同类型之间 PSD 差异很大,即使同一类型同一层位但不同取样地点的 PSD 也有很大差异<sup>[5]</sup>; (2)不同位置孔隙比  $e$  相差较大但一般较低,根据张成恭等<sup>[1]</sup>和徐国刚<sup>[7]</sup>对水利工程中(如葛洲坝,小浪底等)遇到的层间错动带的调查,其孔隙比变化范围在 0.3~0.67 之间。(3)天然含水率较低,在天然情况下已接近固态或者半固态。但层间错动带含水率会受降雨和水文地质条件的影响,地下水位的变化易导致其含水率的变化。但由于其现场取样困难<sup>[8]</sup>,目前针对原状层间错动带试样的高压三轴不排水试验开展甚少。

天然状态下层间错动带是一种非均质的颗粒类材料,现场很难采集到完全一样的试样进行试验。因此,层间错动带原状样试验数据较少且结果会有很高的离散性。本文针对某大型水电站揭露的原状层间错动带,开展了围压最高至 30 MPa 的高压力<sup>[9]</sup>条件下的不排水三轴试验,并结合试样物理性质的差异,分析讨论了原状层间错动带的力学特性。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 地质条件与现场取样

该工程区域属于高原深谷地貌,河谷呈不对称 V 型,地势北高南低,向东侧倾斜,地应力实测表明,最大和最小水平主应力范围分别在 7.2~23.9 MPa 和 5.7~14.1 MPa 之间,应力量级总体为中偏高水平。河谷两岸均有层间错动带出露,其由凝灰岩发育而成:凝灰岩母岩在构造运动过程中发生破碎、错动,从而形成凝灰质的破碎夹层,并在地下水及

风化作用下软弱甚至泥化。工程区域内层间错动带发育规模并不一致,延伸长度在几米甚至数千米,厚度变化较大,最厚处可达 60 cm。X 射线衍射分析揭露其矿物成分主要为榴石、赤铁矿和伊利石。

此次试验原状试样取自该工程区域水平探洞中,首先选择层间错动带厚度大于 10 cm 处作为采样点,再利用特殊的可开合的取样工具(见图 1(a))利用重锤水平贯入取样。将取得的圆柱型试样,其直径 10 cm,高 30 cm(见图 1(b))从采样器中推出,放入镀锌铁皮盒中,上下两端各去掉约 20 mm,加上一块与试样截面面积相当的不透水塑料片,然后浇灌蜡液与容器端齐平,再将上下两端加盖盖严后用粘胶带牢固的缠绕在铁盒外壁以保证固定原状样,最后将整个铁盒浸入蜡液中蜡封以备制样<sup>[10]</sup>。



(a) 可开合取样工具

(b) 圆柱形层间错动带原状样

图 1 工程现场采样图片

Fig.1 The sampling photos taken in the filed

### 2.2 试样制备与试验仪器

用削土刀将取得的原状土柱样两端削平,参照《土工试验方法标准》<sup>[11]</sup>,用切土器把原土柱削至直径 50 mm,高度 100 mm 的圆柱形试样(见图 2(a)),称重后装入密封塑料袋搁置在恒温(22 °C)室以备试验。此外,为了获得原状样的物理性质,将削切下来的土样做颗粒分析和相对密度试验,并取 3 个样品平行测定含水率。本次试验共制得试样 38 个,物理性质试验结果见表 1。试样最大颗粒粒径在 10 cm 左右,粒径分布极不均匀,限制粒径  $d_{60}$  变化范围为 0.074~4.276 mm;由于含有赤铁矿,其相对密度相对较大,均值为 2.93; <0.5 mm 颗粒平均塑限为 11.2%,平均塑性指数为 9.8;孔隙比变化范围为 0.21~0.50,可能由于上覆岩体较厚:270~430 m,但所处应力场并不相同;试样含水率也不相同,但含水率较低,均值为 8.35%,饱和度范围在 96.59%~39.71%。

为了模拟施工期前,采用防渗帷幕或排水等截导流工程措施来减少施工区的水流,从而导致层间错动带中含水率降低的效果,人为将一些试样自然

风干（见表 1），通过称重控制其含水率，当试样达到所设定的含水率时，再次装入密封塑料袋搁置在恒温（22 °C）室中 24 h 以上以备试验。试验前用精度为 0.02 mm 游标卡尺测定了自然风干试样的体积，发现其几乎没有变化：Tinjum 等<sup>[12]</sup>发现，由于失（吸）水分而造成的试样体积变化与其塑性有关，塑性越低，体积变化越小。其次，试样的含水率本身较低，大部分试样低于平均塑限，已接近固态，造成体积收缩较小。含水率降低后，饱和度下限降低至 18.52%。

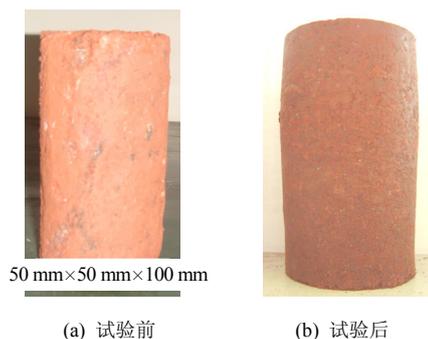


图 2 原状试样示意图  
Fig.2 Schematic of intact samples

表 1 原状样试验结果统计表  
Table 1 Results of tests for undisturbed samples

试样编号	$\sigma_3$ / MPa	$d_{60}$ / mm	$d_{30}$ / mm	密度 $\rho$ / (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比 $e$	含水率 $w^*$ / %	饱和度 $S_r$ / %	$E_0$ / GPa	$\sigma_s$ / MPa	$B_m$
01		0.364	0.045	2.45	0.25	4.23	48.82	3.45	9.4	1.134
02		0.071	0.006	2.25	0.42	8.26	59.69	1.27	4.4	1.392
03		3.225	0.441	2.44	0.30	8.15	80.08	1.92	7.8	2.747
04		0.287	0.027	2.51	0.29	7.12	72.60	1.29	6.1	1.993
05		0.339	0.044	2.50	0.27	7.00	77.52	1.34	6.8	1.915
06	5	0.193	0.024	2.33	0.29	9.01	86.23	0.77	4.7	2.121
07		0.091	0.012	2.57	0.24	6.01	74.87	0.99	5.7	2.220
08		0.517	0.047	2.33	0.41	9.34	65.32	1.21	5.7	1.368
09		0.061	0.005	2.11	0.29	8.89 (2.80)**	96.59 (30.44)	3.49	10.8	1.070
10		0.128	0.019	2.26	0.49	10.55 (3.20)	67.63 (20.51)	2.30	7.9	1.280
11		1.296	0.101	2.37	0.43	7.52 (3.10)	48.79 (20.11)	3.86	13.9	1.271
12		0.429	0.030	2.50	0.32	9.08	87.57	2.24	5.9	2.214
13		2.077	0.075	2.26	0.36	8.18	64.55	2.67	8.9	1.313
14		1.368	0.050	2.55	0.27	6.24	69.08	2.81	9.6	1.699
15		0.487	0.058	2.37	0.29	6.12	59.45	3.19	10.4	1.236
16	10	4.276	0.733	2.51	0.34	8.61	79.61	3.95	8.9	2.565
17		1.129	0.093	2.20	0.42	9.10	62.21	3.28	8.0	1.409
18		1.171	0.069	2.43	0.31	6.92	64.18	3.91	9.2	1.421
19		1.639	0.080	2.50	0.44	6.14	39.71	4.57	14.9	1.170
20		0.814	0.053	2.39	0.28	7.21(3.10)	73.61(31.64)	5.94	21.4	1.153
21		0.372	0.028	2.30	0.45	10.34 (3.10)	68.47 (20.53)	5.70	22.8	1.232
22		0.627	0.073	2.30	0.35	7.59	61.81	5.21	11.8	1.237
23		2.267	0.068	2.40	0.46	10.37	64.70	8.72	12.7	1.936
24		1.991	0.116	2.37	0.39	7.52	59.56	7.29	16.1	1.543
25		2.411	0.085	2.37	0.30	6.83	64.51	6.99	17.0	1.843
26	20	2.256	0.317	2.35	0.35	7.60	63.02	6.71	16.6	1.967
27		0.884	0.060	2.51	0.34	8.51	75.66	4.69	5.7	1.607
28		0.415	0.051	2.42	0.21	7.28	95.43	5.08	5.0	2.218
29		0.741	0.044	2.43	0.36	7.75(3.40)	61.43 (26.95)	8.94	25.4	1.116
30		0.920	0.070	2.41	0.29	6.52 (3.12)	64.81 (31.01)	9.11	27.9	1.035
31		0.261	0.029	2.35	0.33	6.60	57.98	10.02	17.3	1.388
32		1.024	0.086	2.38	0.33	10.45	94.61	6.91	4.2	2.760
33		0.250	0.022	2.47	0.32	6.19	57.44	9.36	28.8	2.500
34	30	0.072	0.008	2.31	0.31	8.31	74.17	8.07	5.1	2.000
35		0.387	0.019	2.34	0.47	6.73	44.43	8.29	29.6	1.290
36		0.613	0.061	2.32	0.38	6.30	46.71	8.90	32.6	1.499
37		0.298	0.016	2.44	0.33	7.32	66.21	8.12	17.1	2.759
38		0.423	0.060	2.13	0.46	8.03(2.90)	51.31(18.52)	10.93	39.2	1.351

注：\*含水率是 3 次含水率试验的平均值；\*\*括号中数据为风干后含水率与饱和度。

试验仪器由中国科学院武汉岩土力学研究所与法国里尔科技大学联合研制,法国 TOP INDUSTRIA 公司生产的 TRIAXIAL CELL V2 三轴仪(见图 3),其由控制系统、油源、轴压系统、围压系统以及位移、荷载传感器等 6 部分组成。该仪器最大围压可达 60 MPa,最大轴压为 600 kN,轴向位移传感器(LVDT)最大量程为 20 mm,在试验过程中可全自动伺服控制并记录数据。



图 3 TRIAXIAL CELL V2 高压三轴仪  
Fig.3 High pressure triaxial apparatus of TRIAXIAL CELL V2

### 2.3 试验内容

由上述可知,即使在现场采样过程中已精心选择取样位置避免离散性,但由于层间错动带天然状态分布的不均匀性,很难对采得的原状样进行分组试验:根据试验规范<sup>[11]</sup>,原状土同一组试样间密度的允许差值不得大于 0.03 g/cm<sup>3</sup>,含水率差值不宜大于 2%,但根据表 1,即使满足了上述要求,但试样粒径分布依然有较大的差别。因此,本次试验认为,单个试样是一均质体,在 5、10、20、30 MPa,与现场地应力水平相当的不同围压下开展了不固结不排水,即含水率和围压为常数的三轴剪切试验,采用轴向位移控制,剪切速率为 0.1 mm/min。当剪切结束后,对每一个试样采用湿筛法做颗粒分析试验。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 强度特性

即使试样初始物理性质不一致,但各个试样的应力-应变关系曲线表现出了相同的趋势,典型的试验结果如图 4 所示。图 4 是试样 No.26、34 和 38 的轴向应变( $\varepsilon_a$ )-偏应力( $q$ )关系曲线,可以看出,试样曲线呈应变硬化型,无明显峰值强度。曲线的非线性特征可由目前岩土工程运用较广泛的 Duncan-Chang 模型描述,即

$$q = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $b$ 为试验参数; $a$ 的倒数即为试样的初始弹性模量 $E_0$ 。各试样 $E_0$ 统计结果见表 1。

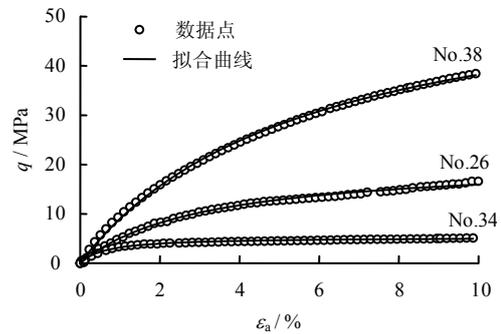


图 4 典型偏应力-轴向应变关系及 Duncan-Chang 模型拟合

Fig.4 Typical relations between the deviatoric stress-axial strain and fitting with Duncan-Chang model

由表 1 可以看出, $E_0$ 在不同的试验条件下最大相差 13 倍,范围为 0.87~11.36 GPa,明显高于低压力下获得的 $E_0$ 。一般来说,在高围压下颗粒间相互嵌入导致颗粒排列更加紧密,颗粒位置不易发生调整,增大了抵抗变形的能力;其次,高围压导致了非饱和土体孔隙闭合,提高了试样的密实度,从而表现出压硬性。此外,从图 5 可以看出, $E_0$ 在随着围压 $p$ 大致落在两条直线范围内,说明 $E_0$ 随 $p$ 的增大而增高,这与曾国熙<sup>[13]</sup>的研究结果相一致。但试验结果明显受物理性质的影响,如 $e$ 、 $d_{60}$ 和 $S_r$ 等其他因素会影响孔隙排列和变形特征,造成其数据离散性。

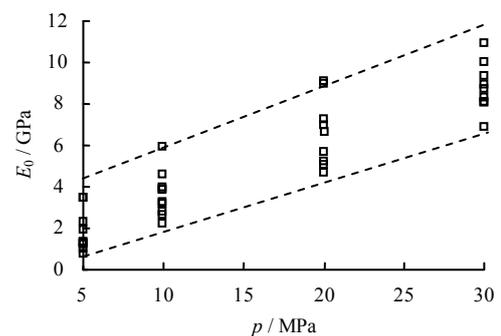


图 5 初始弹性模量 $E_0$ 与围压 $p$ 的关系

Fig.5 Relations between the initial elastic modulus  $E_0$  and confining pressure  $p$

此外,试样明显呈塑性破坏,破坏后呈腰鼓状(见图 2(b))。针对此种破坏形式,本次试验选取轴向应变 $\varepsilon_a = 10\%$ 时的应力为破坏应力 $\sigma_s$ ,统计结果列于表 1。由此可见,试样受外部条件围压影响较大,在较高压力下试样的应力-应变曲线和破坏模式

主要由高围压控制, Bopp 等<sup>[14]</sup>也得到了类似的结论。但从图 6 可以看出,  $p$  对  $\sigma_s$  的作用可根据饱和度  $S_r$  大致分为图中虚线所隔开的 3 个区域: I 区试样初始饱和度  $S_r$  较高的情况下 ( $S_r > 70\%$ ),  $\sigma_s$  几乎与围压无关, 表现出饱和土的性质, 但趋势线表明,  $\sigma_s$  随着围压升高反而表现出下降的趋势; II 区当  $S_r$  在  $50\% \sim 70\%$  时, 数据点较为离散, 但总体上  $\sigma_s$  随围压的增高而增大; III 区当  $S_r < 50\%$  时,  $\sigma_s$  明显高于同一围压下低饱和度试样的强度, 并随着围压的增高而增大。根据 Miura 等<sup>[15]</sup>对火山灰土的研究, 指出颗粒破碎是造成强度包线非线性的根本原因, 而层间错动带作为一种夹杂着错动后残留有岩石碎屑(块)软弱物质的颗粒类材料, 在高压下有可能发生了大规模的颗粒破碎, 从而造成 I 区  $\sigma_s$  反而随着  $p$  的增高而降低。

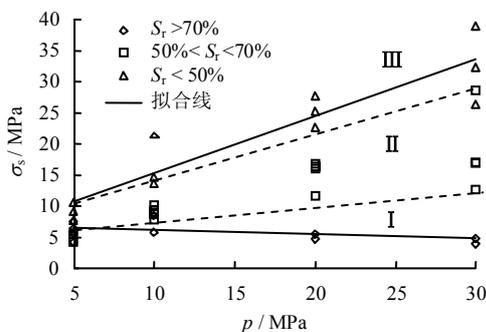


图 6 围压  $p$  与破坏应力  $\sigma_s$  的关系

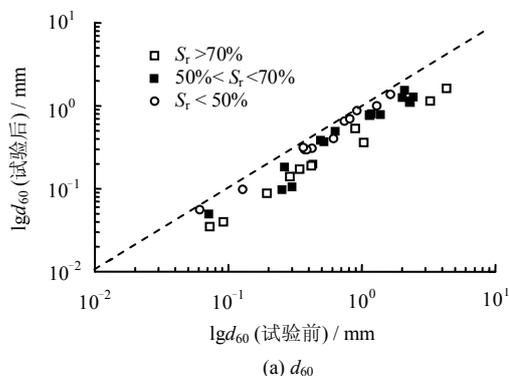
Fig.6 Relations between confining pressure  $p$  and failure stress  $\sigma_s$

### 3.2 颗粒破碎特征

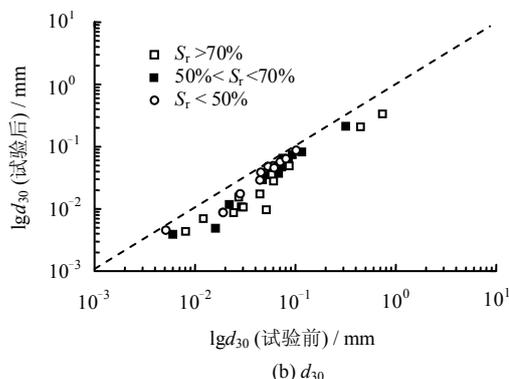
图 7 为颗粒分析试验结果, 其中, 图 7(a)为试样  $d_{60}$  试验后与试验前双对数坐标系下的对比图, 可以看出, 数据点均在对角线的下半部分, 说明试验后试样 PSD 发生了改变, 颗粒逐渐变细。 $d_{30}$  (见图 7(b)) 也发生了类似的变化。因此, 层间错动带与钙质砂、堆石料等软弱材料<sup>[16-17]</sup>的性质类似, 在高压剪切作用下会发生颗粒破碎现象。但进一步地分析发现, 不同饱和度试样的颗粒破碎程度并不相同: 如果采用 Lee 等<sup>[18]</sup>提出的以试样破碎前后级配曲线上某一含量(如  $d_{60}$ ,  $d_{30}$  等)的相应粒径之比 ( $B_m$ ) 来表示破碎程度, 从图 7 可以看出, 即使试样的初始物理性质和围压并不相同, 但试样的饱和度越高, 试验后  $d_{60}$  (或  $d_{30}$ ) 越偏离角平分线, 即颗粒破碎程度越大, 以  $d_{60}$  为参考粒径的  $B_m$  具体计算结果见表 1。由此可见, 高饱和度下颗粒越容易破碎: 在高饱和度比较湿润的条件下, 水分易侵入到颗粒裂隙或缺陷中, 在水的润滑作用下, 颗粒更

容易破裂。这与 Miura 等<sup>[19]</sup>的研究成果相一致。

颗粒破碎会剧烈地改变试样内在结构, 从而影响其抗剪强度<sup>[20]</sup>。因此, 在均为 10% 相同的剪切应变条件下<sup>[16]</sup>, 高饱和度试样发生了不同程度的颗粒破碎并随着围压的增高而增大(见表 1), 导致图 5 中 I 区的强度趋势线随围压增高而降低; 但低饱和度试样并未受颗粒破碎的影响(见图 5 III 区)。此外, 值得注意的是,  $E_0$  似乎并未受到颗粒破碎的影响而发生随着围压的增高而降低的现象(见图 5), 由于试验围压与地应力场量级相当, 其可能已在天然地应力场中达到稳定状态。此外, 根据杨光等<sup>[21]</sup>和吴京等<sup>[22]</sup>的研究, 发现颗粒破碎主要来源于剪切过程而非施加围压的过程, 因此, 可推测  $E_0$  没有受到颗粒破碎的影响。



(a)  $d_{60}$



(b)  $d_{30}$

图 7 试样试验前与试验后某含量颗粒粒径变化  
Fig.7 Variations of particle size with some content for samples before and after test

### 3.4 多元回归分析

从图 5、6 可以看出, 层间错动带强度特征不仅与试验条件如围压有关, 而且受物理性质等诸多因素制约。下文将采用多元回归方法对试验结果  $E_0$  和  $\sigma_s$  进行拟合, 研究不同因素对强度特征的影响。更进一步地分析发现, 试样各个物理因素之间存在相关性:  $d_{60}$  与  $d_{30}$  的相关系数为 0.71,  $w$  和  $S_r$  的相关系数为 0.56, 为了提高回归方程的效率<sup>[23]</sup>, 本文

仅考虑围压  $p$ 、 $d_{60}$ 、 $e$ 、 $S_r$  共 4 个因素(样本数  $n=38$ , 见表 1) 分别对强度特征值  $E_0$  和  $\sigma_s$  进行多元回归分析, 可以得到以下式子

$$E_0 = 6.66 + 0.29p + 0.48d_{60} - 9.25e - 5.86S_r \quad (2)$$

$$\sigma_s = 12.21 + 1.03p + 1.90d_{60} - 25.37e - 1.92pS_r \quad (3)$$

式中:  $E_0$  单位为 GPa;  $\sigma_s$  为 MPa;  $p$  为 MPa;  $d_{60}$  为 mm。其中, 考虑到不排水条件下  $p$  与  $S_r$  的交互作用(见图 6), 式(3)采用了  $pS_r$  形式代替了  $S_r$ 。

设显著性水平  $\alpha=0.05$ , 各因素统计量  $t$  值(见表 3) 均大于  $t_{0.05, 33}=2.035$ , 认为各因素回归系数在统计上是显著的。此外, 式(2)、(3)的  $F$  值(见表 3) 大于  $F_{0.05}(4, 33)=5.74$ , 因此, 式(2)、(3)建立的多元回归模型有效。

表 2 多元回归分析结果  
Table 2 Analysis of multi-regression results

强度参数	统计值	$P$	$d_{60}$	$e$	$S_r$	$pS_r$
$E_0$	$F$ 值			189.720		
	$t$ 值	25.760	4.210	5.010	9.760	
	PCC	0.976	0.591	-0.657	-0.862	
$\sigma_s$	$F$ 值			81.560		
	$t$ 值	16.790	2.040	3.230		13.790
	PCC	0.946	0.335	-0.490		-0.923

### 3.5 敏感性分析

根据式(2)、(3), 采用偏相关系数(PCC)作为影响因素敏感性的判据, 具体计算结果见表 2。对于  $E_0$ , 各因素影响程度大小排序为:  $p > S_r > e > d_{60}$ , 其中,  $E_0$  随着  $p$  和  $d_{60}$  的增大而增高, 而随着  $S_r$  和  $e$  的增大而减小;  $p$  和  $pS_r$  对  $\sigma_s$  的影响程度最大, 而  $d_{60}$  的影响程度最小, 其中,  $\sigma_s$  随着  $p$  和  $d_{60}$  的增大而增高, 而随着  $pS_r$  和  $e$  的增大而减小。可以看出, 围压  $p$  和饱和度  $S_r$  是影响层间错动带强度特征的重要因素, 而粒径分布的影响程度最小: 这与郭庆国<sup>[24]</sup>的研究成果相一致: 只有试样粒径大于 5 mm 且含量超过 30% 时才对剪切特性有显著影响。

根据以上分析, 对于实际工程而言, 应重点关注由于开挖卸荷而造成的层间错动带赋存应力场的变化, 防止其强度下降过快而造成滑动或失稳; 此外, 饱和度的下降会显著提高其强度特性, 有必要采用防渗帷幕或排水等截导流工程措施来减少施工区的水流, 从而降低层间错动带中的含水率。

## 4 结 论

(1)层间错动带的应力-应变曲线和破坏模式主

要由高围压控制, 其应力-应变关系曲线均为应变硬化型, 破坏后呈腰鼓状为塑性破坏。

(2)水分易侵入到颗粒裂隙中, 在水的润滑作用下, 较湿颗粒更容易破裂, 且颗粒破碎是造成高饱和度试样强度包线的趋势线随围压下降的根本原因; 此外,  $E_0$  并未受到颗粒破碎的影响: 颗粒破碎主要来源于剪切过程而非施加围压的过程。

(3)受试验条件围压和物理性质的影响, 试验结果呈现了很大的离散性。影响初始弹性模量  $E_0$  的影响因素排序为:  $p > S_r > e > d_{60}$ ;  $p$  和  $pS_r$  的交互作用对  $\sigma_s$  的影响程度最大, 而  $d_{60}$  的影响程度最小。因此, 在实际工程中, 层间错动带赋存应力场的变化应给予重视; 此外, 施工前期有必要采用截导流工程措施来减少施工区的水流, 从而降低层间错动带中的含水率。

(4)由于本次试验是模拟现场条件而得到的结果, 当实际工程中的层间错动带与本次试验试样物理性质相似, 可以采用式(2)、(3)作为试验条件范围内的层间错动带的强度特征( $E_0$  和  $\sigma_s$ ) 的初步预测。

## 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 Geology*, 1990, 30(2): 160-167.
- [2] VESIC A B, CLOUGH G W. Behaviour of granular materials under high stresses[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(8M 3): 661-688.
- [3] TAI T. Strength and deformation characteristics of cohesionless materials at high pressures[D]. North Carolina: Duke University, 1970.
- [4] LADE P V, YAMAMURO J A. Undrained sand behaviour in axisymmetric tests at high pressures[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(2): 120-129.
- [5] 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.
- [6] 王行本. 关于软弱夹层的抗剪强度问题[J]. 水利发电, 1985, 4: 51-56  
WANG Xing-ben. The shear strength of the infilled joint

- soils[J]. **Water Power**, 1985, 4: 51—56.
- [7] 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, 110(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, 110(10): 33—36.
- [8] 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 on engineering properties of weak layers under ground stresses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 584—587.
- [9] 马金荣. 深层土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学建筑工程学院, 1999.
- [10] 中南勘察设计院. JGJ 89—92 原装样取样技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [12] TINJUM J M, BENSON C H, BLOTZ L R. Soil water characteristic curve of compacted clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(11): 1060—1069.
- [13] 曾国熙. 正常固结黏土不排水剪的归一化性状[C]//中国水利学会岩土力学专业委员会: 软土地基学术讨论会论文选集. 北京: 水利出版社, 1980: 13-26.
- [14] BOPP P A, LADE P V. Relative density effects on undrained sand behaviour at high pressures[J]. **Soils and Foundations**, 2005, 45(1): 15—26.
- [15] MIURA S, YAGI K, ASONUMA T. Deformation-strength evaluation of crushable volcanic soils by laboratory and in-situ testing[J]. **Soils and Foundations**, 2003, 43(4): 47—57.
- [16] 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.
- [17] 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 on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1237—1246.
- [18] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1967, 4(1): 68—100.
- [19] MIURA N, YAMANOUCI T. Effect of pore water on the behavior of a sand under high pressures[J]. **Technology Reports of the Yamaguchi University**, 1974, 1(3): 409—417.
- [20] BOLTON M D, NAKATA Y, CHENG Y P. Micro- and macro-mechanical behavior of DEM crushable materials[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(6): 471—480.
- [21] 杨光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗颗粒的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 338—342.  
YANG Guang, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(3): 338—342.
- [22] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 19—55.  
WU Jing-ping, ZHE Yao, LOU Zhi-gang. The effect of particle crushing on the deformation and strength behaviour of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(5): 19—55.
- [23] AGUS S S, LEONG E C, RAHARDJO H. Soil water characteristic curves of Singapore residual soils[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2001, 19(3—4): 285—309.
- [24] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.